



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**“AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA
MEDICIÓN DE FLUJO Y CONTROL MEDIANTE UN
SISTEMA SCADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL
INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

**TIERRA CHULLI DARWIN GEOVANNY
ZAMORA PAUCAR MILTON JAVIER**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2017**

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-05-19

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**TIERRA CHULLI DARWIN GEOVANNY
ZAMORA PAUCAR MILTON JAVIER**

Titulado:

**“AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA MEDICIÓN DE
FLUJO Y CONTROL MEDIANTE UN SISTEMA SCADA EN EL
LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE
MECÁNICA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Dr. Marco Antonio Haro Medina
DIRECTOR

Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo
ASESOR

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: Tierra Chulli Darwin Geovanny

TRABAJO DE TITULACIÓN: **“AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA MEDICIÓN DE FLUJO Y CONTROL MEDIANTE UN SISTEMA SCADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Fecha de Examinación: 2017-02-22

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Dr. Marco Antonio Haro Medina DIRECTOR			
Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: Zamora Paucar Milton Javier

TRABAJO DE TITULACIÓN: **“AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA MEDICIÓN DE FLUJO Y CONTROL MEDIANTE UN SISTEMA SCADA EN EL LABORATORIO DE CONTROL INDUSTRIAL DE LA FACULTAD DE MECÁNICA”**

Fecha de Examinación: 2017-02-22

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos PRESIDENTE TRIB.DEFENSA			
Dr. Marco Antonio Haro Medina DIRECTOR			
Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los Tierra D. & Zamora M.. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Tierra Chulli Darwin Geovanny

Zamora Paucar Milton Javier

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Darwin Geovanny Tierra Chulli y Milton Javier Zamora Paucar, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como Tierra D. & Zamora M., asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Tierra Chulli Darwin Geovanny
Cedula de Identidad: 060410004-0

Zamora Paucar Milton Javier
Cedula de Identidad: 180460377-5

DEDICATORIA

Dedico principalmente a Dios por mi objetivo cumplido con empeño, fuerza y sabiduría que en el camino de mi vida me ha brindado sin dejar que me derrumbe por las adversidades hasta alcanzar mi meta.

Dedico la meta alcanzada a mis padres que me han encaminado con buenos valores, además de estar presentes en todos los momentos de mi vida

A mi familia en general que con sus consejos he tomado decisiones correctas, además del apoyo en experiencias que nos da la vida.

Darwin Geovanny Tierra Chulli

Dedico este logro a Dios por estar presente en todo momento, guiándome cada día, dándome fuerza y sabiduría para atravesar todas las adversidades hasta alcanzar mi meta anhelada.

A mis padres quienes me han estado siempre a mi lado a pesar de las dificultades, sin dejarme caer, enseñándome valores cada día, dándome aliento para vencer los obstáculos que se pongan en mi camino hasta llegar a cumplir el propósito anhelado.

A mis hermanos, familia y amigos que con su apoyo moral y buenos consejos me impulsaron para seguir siempre adelante.

Milton Javier Zamora Paucar

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis profesores y autoridades de la Facultad de Mecánica quienes nos guiaron para el desarrollo de este trabajo.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por darme la oportunidad de adquirir conocimientos para poder emplearlos en la vida profesional.

Agradezco al Dr. Marco Haro e Ing. Pablo Montalvo, por brindarme su amistad y asesoramiento de la tesis, quienes con la ayuda de su conocimiento y experiencia se logró elaborar el presente documento.

Darwin Geovanny Tierra Chulli

Agradezco a Dios por darme fortaleza para lograr mis metas, a mi familia por brindarme todo el cariño y confianza para ver culminada una meta más de la vida.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, por darme la oportunidad de obtener una profesión, y ser una persona útil a la sociedad.

Agradezco al Dr. Marco Haro e Ing. Pablo Montalvo, por brindarme su amistad y asesoramiento de la tesis, quienes con la ayuda de su conocimiento y experiencia se logró elaborar el presente documento.

Milton Javier Zamora Paucar

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i>	2
2.	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Sistema SCADA.....	3
2.1.1	<i>Propósitos.</i>	3
2.1.2	<i>Arquitectura de un sistema SCADA.</i>	4
2.1.3	<i>Comunicaciones.</i>	6
2.1.3.1	<i>Controladores específicos.</i>	6
2.1.3.2	<i>Controladores genéricos.</i>	7
2.2	Acondicionamiento de señales	7
2.2.1	<i>Interfaces, dominios y conversiones de datos</i>	8
2.3	Medición de flujo	9
2.3.1	<i>Medidor de flujo de turbina.</i>	9
2.3.2	<i>Medidor de desplazamiento positivo</i>	11
2.3.3	<i>Factores que influyen en la medición de flujo.</i>	12
2.3.3.1	<i>Rango.</i>	13
2.3.3.2	<i>Exactitud requerida.</i>	13
2.3.3.3	<i>Pérdida de presión.</i>	13
2.3.3.4	<i>Tipo de indicación.</i>	13
2.3.3.5	<i>Tipo de fluido.</i>	13
2.3.3.6	<i>Calibración.</i>	14
2.4	Control automático.....	14
2.4.1	<i>Controlador automático</i>	15
2.4.2	<i>Lazo abierto.</i>	15
2.4.3	<i>Lazo cerrado.</i>	15
2.4.4	<i>Elementos de un lazo de control automático.</i>	17

2.5	Control PID	18
2.5.1	<i>Controlador PID</i>	18
2.5.1.1	<i>Acción proporcional</i>	19
2.5.1.2	<i>Acción integral</i>	20
2.5.1.3	<i>Acción derivativa</i>	20
2.5.1.4	<i>Características control PID</i>	21
2.5.2	<i>Método de Ziegler-Nichols</i>	21
2.5.2.1	<i>Método de la respuesta en escalón</i>	22
3.	SITUACIÓN PREVIA Y MEJORA POTENCIAL	23
3.1	Diseño original del sistema	24
3.1.1	<i>Partes que constituyen el proceso original</i>	25
3.1.2	<i>Funciones de cada una de las partes</i>	26
3.1.3	<i>Principales elementos físicos que posee</i>	27
3.1.3.1	<i>Equipos</i>	27
3.1.3.2	<i>Instrumentos</i>	28
3.1.3.3	<i>Accesorios</i>	28
3.2	Propuesta para mejora del banco de pruebas	29
3.2.1	<i>Tanques de almacenamiento</i>	29
3.2.2	<i>Bomba centrífuga</i>	30
3.2.3	<i>Transductor electroneumático</i>	31
3.2.4	<i>Medidor de turbina</i>	34
3.2.5	<i>Transmisores</i>	35
3.3	Diseño con mejoras propuestas	37
3.3.1	<i>Esquema con mejora</i>	37
4.	COMPONENTES FÍSICOS Y SOFTWARE PARA DESARROLLO	39
4.1	Instrumentación.....	39
4.1.1	<i>Indicadores</i>	39
4.1.1.1	<i>Termómetro bimetalico</i>	39
4.1.1.2	<i>Manómetro tipo Bourdon</i>	40
4.1.2	<i>Transmisores</i>	41
4.1.2.1	<i>Transmisores electrónicos</i>	42
4.1.2.2	<i>Transmisor de presión de inductancia</i>	43
4.1.2.3	<i>Transmisor de temperatura</i>	44

4.1.3	<i>Válvulas de control</i>	45
4.1.4	<i>Transductor.</i>	46
4.1.4.1	<i>Transductor electroneumático</i>	47
4.1.5	<i>Totalizador</i>	48
4.1.6	<i>Medidor de caudal de turbina</i>	49
4.2	<i>Bomba centrífuga.</i>	50
4.3	<i>Convertidor de frecuencia</i>	51
4.3.1	<i>Principio de funcionamiento de un convertidor de frecuencia</i>	51
4.3.2	<i>Funciones que realiza el sistema de control</i>	52
4.4	<i>Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009</i>	54
4.4.1	<i>Conectores.</i>	55
4.4.2	<i>Hardware.</i>	56
4.4.3	<i>Aplicaciones generales</i>	56
4.4.4	<i>Adquisición de datos.</i>	57
4.5	<i>LabVIEW</i>	58
4.5.1	<i>Entorno.</i>	58
4.5.2	<i>Controles</i>	59
4.5.3	<i>Funciones</i>	60
4.5.4	<i>Creación de programas.</i>	61
4.5.5	<i>Flujo de ejecución.</i>	61
4.6	<i>Calibración de instrumentos</i>	62
4.6.1	<i>Tipos de errores</i>	63
4.6.1.1	<i>Error cero.</i>	64
4.6.1.2	<i>Error de multiplicación</i>	64
4.6.1.3	<i>Error de angularidad</i>	64
5.	INSTALACIONES GENERALES Y PROGRAMACIÓN	65
5.1	<i>Instalación y recambio de elementos</i>	65
5.1.1	<i>Cambio de tanques de almacenamiento</i>	66
5.1.2	<i>Cambio de bomba centrífuga</i>	67
5.1.3	<i>Instalación de convertidor de frecuencia</i>	68
5.1.4	<i>Instalación de medidor de turbina.</i>	70
5.1.5	<i>Revisión de transmisores</i>	70
5.1.2	<i>Montaje de tarjeta de adquisición de datos.</i>	72

5.1.2.1	<i>Instalación de LabVIEW</i>	72
5.1.2.2	<i>Instalación de NI-DAQmx.</i>	73
5.1.2.3	<i>Montaje de la tarjeta</i>	74
5.1.3	<i>Conexión de instrumentos a la DAQ USB-6009</i>	75
5.1.4	<i>Montaje de tablero de control</i>	76
5.2	<i>Programación gráfica en LabVIEW</i>	77
5.2.1	<i>Adquisición de señales de presión y temperatura.</i>	77
5.2.2	<i>Adquisición de datos de sensor de caudal</i>	81
5.2.3	<i>Configuración de salidas digitales para control del variador de frecuencia ..</i>	83
5.2.4	<i>Configuración de salida analógica para transductor electroneumático</i>	85
5.2.5	<i>Programa completo en LabVIEW para medición y control de flujo</i>	87
5.2.6	<i>Panel de control en LabVIEW</i>	88
5.2.7	<i>Pruebas de funcionamiento generales</i>	89
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1	<i>Conclusiones</i>	92
6.2	<i>Recomendaciones</i>	93

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

1.	Sistema de supervisión y mando.....	4
2.	Sistema SCADA básico	5
3.	Controladores específicos	6
4.	Controladores genéricos, OPC.....	7
5.	Medidor de flujo tipo turbina.....	10
6.	Principio de operación	11
7.	Bloques que componen un control básico	14
8.	Diagrama de bloque, lazo cerrado	16
9.	Diagrama de bloques de un lazo de realimentacion simple.....	19
10.	Caracterización de la respuesta en escalón	22
11.	Esquema original banco de pruebas.....	24
12.	Estado previo del banco de pruebas.....	25
13.	Tanques de almacenamiento deteriorados	30
14.	Circuito acondicionador de señal para transductor	31
15.	Transductor neumático descompuesto.....	32
16.	Reparación de transductor electroneumático	33
17.	Desmontaje de medidor de turbina	34
18.	Señal de onda emitido por pick up.....	35
19.	Acondicionador de señal para transmisores.....	36
20.	Tablero de control con mal aspecto	36
21.	Esquema del sistema con mejora propuesta	38
22.	Termómetro bimetalico.....	40
23.	Manómetro Bourdon.....	41
24.	Transmisores electrónicos.....	42
25.	Transmisor de presión.....	43
26.	Transmisor de temperatura	44
27.	Válvula de control neumática	45
28.	Transmisor electroneumático.....	47
29.	Totalizador mecánico de flujo	48
30.	Caudalímetro.....	49
31.	Bomba centrífuga 1HP WEG	50

32. Convertidor de frecuencia electrónico	51
33. Funcionamiento de un convertidor de frecuencia.....	52
34. Convertidor de frecuencia CFW500	53
35. NI USB-6008/6009	54
36. Diagrama de bloques de componetes de NI USB-6008-6009	56
37. Partes de un sistema DAQ	57
38. Entorno general LabVIEW	58
39. Representación general de controles.....	59
40. Menú o paleta de funciones	60
41. Relación de salida y entrada en instrumentos	62
42. Curva variable real-lectura.....	63
43. Errores, cero, multiplicación y angularidad.....	64
44. Cambio de tanques de almacenamiento.....	66
45. Cambio de bomba centrífuga.....	67
46. Circuito de mando para variador CFW500.....	68
47. Interface de operación CFW500	69
48. Cambio de medidor de turbina.....	70
49. Limpieza y ajuste de transmisores	71
50. Montaje de transductor electroneumático.....	71
51. Herramientas NI-DAQmx.....	73
52. Montaje de DAQ 6009 en panel	74
53. Conexión de instrumentos a DAQ	75
54. Circuito de placa acondicionadora de señales	75
55. Tablero de control modificado.....	76
56. DAQ Assistant	77
57. Adquisición de señales.....	78
58. Adquisición de señales, entradas analógicas	78
59. Selección de entradas analógicas	79
60. Configuración de rangos de entrada	79
61. Conexión diferenciada para presión y temperatura	80
62. Programación de señales de presión y temperatura	80
63. Contador de pulsos.....	81
64. Entrada de contador de NI DAQ 6009.....	81

65. Configuración de contador.....	82
66. Programas de contador para medir caudal	82
67. Creación de salida digitales	83
68. Salidas digitales	84
69. Creación de las salidas digitales	84
70. Control automático de variador CFW500.....	85
71. Creación de salida analógica de voltaje	86
72. Configuración salida analógica.....	86
73. Programa para controlar válvula electroneumática	86
74. Programa para medición y control de flujo	87
75. Panel de control en LabVIEW	88
76. Condiciones de arranque sugeridas.....	90
77. Pruebas con control PID	91
78. Cambio de variables en el proceso	91

LISTA DE TABLAS

1.	Clasificación de sensores	8
2.	Efectos de los controladores PID	21
3.	Parámetros para método respuesta escalón.....	22
4.	Especificaciones técnicas termómetro bimetálico	40
5.	Especificaciones técnicas manómetro Bourdon	41
6.	Especificaciones técnicas de transmisor de presión	43
7.	Especificaciones técnicas de transmisor de temperatura	44
8.	Especificaciones técnicas válvula neumática	45
9.	Características técnicas transmisor neumático	47
10.	Especificaciones técnicas de totalizador mecánico	48
11.	Características técnicas de flujómetro	49
12.	Características técnicas bomba centrífuga	50
13.	Características técnicas variador de frecuencia	53
14.	Bloque de tablas analógicos y digitales	55
15.	Parámetros modificados de variador CFW500	69
16.	Requisitos del sistema para instalar LabVIEW	72
17.	Combinaciones de salidas digitales para velocidades.....	83

RESUMEN

El presente trabajo detalla la automatización del banco de pruebas de control y flujo mediante un sistema SCADA con un algoritmo de control PID para el laboratorio de Control Industrial de la Facultad de Mecánica para controlar variables en caudal, presión y temperatura, el mismo que tiene la capacidad de presentar lecturas a través del computador. Mediante un sistema SCADA se obtiene y controla datos de variables provenientes de la medición de flujo de un proceso, esto se logra a través de los distintos instrumentos instalados en el sistema que transmiten señales a una tarjeta de adquisición de datos para poder realizar la interfaz con el computador por medio de LabVIEW. Las señales provenientes se acondicionan de acuerdo a las características de la tarjeta de adquisición de datos, se normalizaron a corriente en un valor de 4 a 20 mA y en voltaje de 0.5 V DC. Las perturbaciones en el sistema se realizan mediante un convertidor de frecuencia y el control de flujo por medio de una válvula proporcional neumática. En la interfaz de usuario se puede observar que las unidades de medición de las variables de proceso, coinciden con los registros de los indicadores instalados en el módulo. Las pruebas del módulo permiten al usuario supervisar y controlar la evolución del proceso, para lo cual se recomienda seguir las guías para el estudiante.

PALABRAS CLAVE:

<CONTROL CON SUPERVISIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS (SCADA)>, <TRANSMISORES>, <PLATAFORMA Y ENTORNO DE DESARROLLO PARA DISEÑAR SISTEMAS (LabVIEW)>, <VARIADOR DE FRECUENCIA>, <VÁLVULA PROPORCIONAL>, <CONTROL AUTOMÁTICO>.

ABSTRACT

The present work detail the automation of the control and flow test bench through a SCADA system with a PID control algorithm for the Industrial Control laboratory of Mechanics Faculty to control variables flow, pressure and temperature, which has the ability to present readings through the computer. Through a SCADA system can obtain and control data of variables from the measurement of flow of a process, this is archived through the different instruments installed in the system that transmit signals to a data acquisition card to be able to interface with the computer through LabVIEW. The signals were conditioned according to the characteristics of the data acquisition card, were normalized to current in a value of 4 to 20mA and in voltage of 0-5 V DC. The disturbances in the system are made by a frequency converter and the flow control by means of a proportional pneumatic valve. In the user interface it can be seen that the process variable measurement units coincide with the registers of the indicators installed in the module. The test of the module allow the user to supervise and control the evolution of the process, which is a recommended to follow the guidelines for the student.

KEYWORDS:

<CONTROL WITH SUPERVISION AND ACQUISITION OF DATA (SCADA)>, <TRANSMITTERS>, <PLATFORM AND DEVELOPMENT ENVIRONMENT FOR DESIGNING SYSTEMS (LABVIEW)>, <FREQUENCY VARIABLE>, <PROPORTIONAL VALVE>, >AUTOMATIC CONTROL>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El Laboratorio de Control y Automatización de la Facultad de Mecánica fue dotado con un módulo de pruebas para medición y control de flujo en el año 2006, el mismo que es utilizado por los estudiantes para el desarrollo de conocimientos en temas de control y automatización.

El módulo está provisto de varias herramientas de interés para el practicante, que busque aprender y comprender como funciona un proceso controlado, además de tener apariencia similar a procesos industriales, ayudando de esta manera al alumno a familiarizarse con este tipo de sistemas.

Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías en esta última década y al interés de los alumnos en busca de nuevos conocimientos nace la iniciativa de agregar dispositivos al módulo para aprovechar al máximo el uso que puede brindar, sin olvidar que facilitará la comprensión del estudiante.

1.2 Justificación

Para la formación de un profesional es necesario variedad de recursos que fortifique su conocimiento, los cuales deben actualizarse y mantenerse funcionales para el constante aprendizaje; módulos que brindan experiencias pre-profesionales que deben ser aprovechados en su totalidad, disponibles en el laboratorio de control y automatización; es por tal motivo que se requiere automatizar el banco de pruebas para medición de flujo y control.

El banco de pruebas de medición y control de flujo cuenta con instrumentos de medición de caudal, temperatura, presión y un elemento de control. Para automatizar el módulo, es necesario reacondicionar y añadir nuevos elementos, mejorando las condiciones en que se encuentra, brindando al usuario herramientas que no posee el sistema original.

La adquisición de datos es el medio por el cual se recepta información de variables de proceso, a la vez que puede enviar órdenes a los elementos de control. Por tal motivo es necesario instalar una tarjeta DAQ, que provee al usuario una gama de posibilidades a la hora de realizar control y automatización de procesos.

Este módulo ayudara al alumno a comparar las modalidades de funcionamiento de todos los elementos e instrumentos instalados, además de poder visualizar en tiempo real las variaciones que se producen en el sistema por medio de los indicadores y el computador a través de la tarjeta DAQ 6009. También se podrá hacer uso como módulo de programación ya que se puede modificar partes del sistema, actividad que hoy en día es vital para el ingeniero de mantenimiento por estar dispuesto a sistemas SCADA.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Automatizar el banco de pruebas para medición de flujo y control mediante un sistema SCADA en el Laboratorio de Control Industrial de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Seleccionar e instalar los dispositivos, elementos y componentes necesarios para automatizar el módulo de medición de flujo y control.

Realizar la programación gráfica para la automatización y control utilizando el software LabVIEW

Realizar pruebas de funcionamiento en conjunto para supervisar y controlar la evolución del proceso de medición de flujo.

Desarrollar un plan de mantenimiento y una guía para el estudiante sobre el uso del banco de pruebas de medición de flujo y control.

|

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema SCADA

Siglas en inglés, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos). Es referente a algún tipo de software que permite el acceso a datos remotos dentro de un proceso, permitiendo al usuario utilizar herramientas de comunicación, para de esta forma realizar el control del mismo (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

2.1.1 Propósitos. Según (RODRÍGUEZ PENIN, 2007) los sistemas SCADA se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos destaca:

- **Economía:** es más sencillo, rápido y eficiente verificar lo que ocurre en una instalación desde la comodidad de la oficina que enviar a un operario a realizar esa tarea.
- **Accesibilidad:** se puede modificar parámetros de funcionamiento desde la mesa de trabajo por medio de un ordenador.
- **Mantenimiento:** se puede utilizar los datos adquiridos del proceso de tal manera que estos sean integrados a un programa de mantenimiento.
- **Ergonomía:** el usuario tiene la facilidad de visualizar lo que ocurre en el proceso desde un ordenador en lugar de grandes paneles repletos de cables, lo que genera un gran ahorro de recursos.
- **Gestión:** todos los datos recopilados pueden ser valorados en múltiples maneras mediante herramientas estadísticas, gráficas, valores tabulados, etc., que permitan explotar el sistema con el máximo rendimiento posible.

- **Flexibilidad:** se puede obtener más beneficios en sistemas de visualización al tener la facilidad de poder modificar el programa sin necesidad de realizar instalaciones físicas adicionales.
- **Conectividad:** es sistema abierto que permite la comunicación entre varios protocolos.

Según (RODRÍGUEZ PENIN, 2007) todos los sistemas de mayor o menor complejidad orientados a lo anteriormente dicho, aparecen bajo uno de los nombres más habituales para definir esta relación:

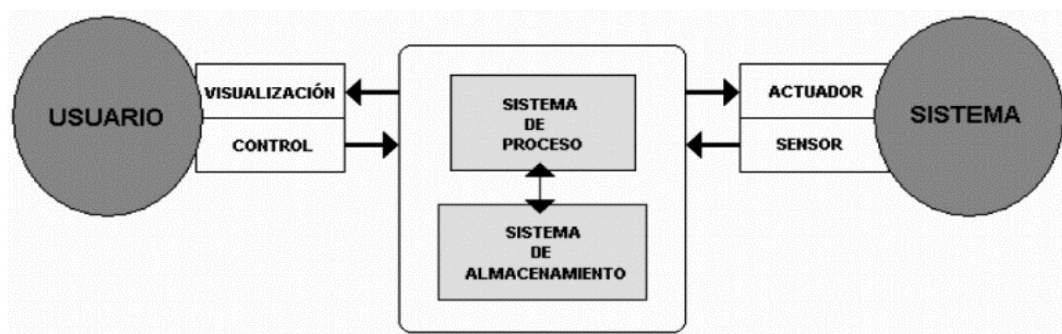
MMI: *Man Machine Interface*, Interfaz Hombre-Máquina

HMI: *Human Machine Interface*, Interfaz Humano-Máquina

2.1.2 Arquitectura de un sistema SCADA. Según (RODRÍGUEZ PENIN, 2007) el desarrollo del ordenador personal ha permitido su implantación en todos los campos y niveles del conocimiento. De esta manera el sistema queda dividido en tres bloques principales:

- Software de adquisición de datos y control(SCADA)
- Sistema de adquisición y mando (sensores y actuadores)
- Sistemas de interconexión (comunicaciones)

Figura 1. Sistema de supervisión y mando



Fuente: Aquilino Rodríguez Penin

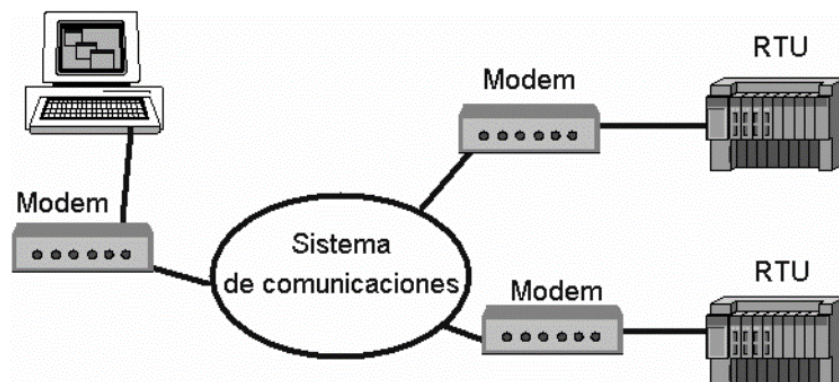
El usuario al contar con varias herramientas que permiten la visualización y control, tiene acceso a todo el sistema de control perteneciente a cada uno de los procesos, por lo general esto se encuentra en un ordenador que contiene la aplicación, la supervisión y finalmente el control. Dicha comunicación entre los sistemas mencionados se enlazan a través de redes corporativas o también llamados Ethernet (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

Dentro del sistema el proceso capta su estado por medio de sensores y elementos, luego se le informa a la persona a través de herramientas HMI, todo esto basándose en distintos comandos ejecutados por el usuario. El proceso da inicio a acciones oportunas para que el control se mantenga por medio de los elementos actuadores (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

Toda la transmisión de datos que se llevan a cabo entre sensores y actuadores se lleva a cabo por intermedio de buses de campo. Al mismo tiempo toda esta información que se genera en el transcurso de las tareas de control y supervisión se guardan para después disponer de ellos (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

Un sistema SCADA es una aplicación de software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción que proporciona comunicación entre los dispositivos de campo llamados también RTU (*Remote Terminal Units* o Unidades remotas), se puede encontrar elementos tales como controladores autónomos o autómatas programables, en un centro de control o Unidad Central (MTU, *Master Terminal Unit*), donde se controla el proceso de forma autónoma desde la pantalla de uno o varios ordenadores. (RODRÍGUEZ PENIN, 2007)

Figura 2. Sistema SCADA básico



Fuente: Aquilino Rodríguez Penin

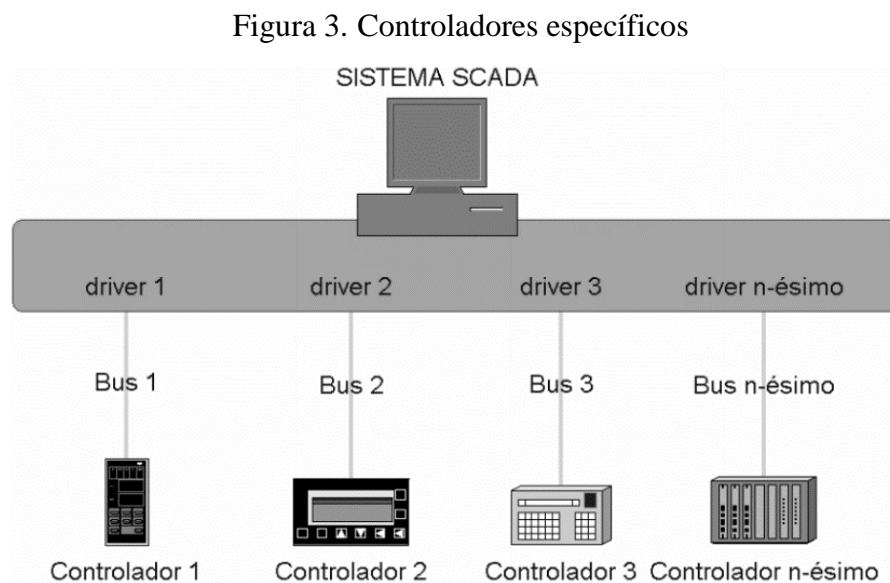
La estructura funcional de un sistema de visualización y adquisición de datos obedece generalmente a la estructura Maestro-Eslavo. La estación central (el maestro o *master*) se comunica con el resto de estaciones (esclavos o *slaves*) requiriendo de estas una serie de acciones y datos. (RODRÍGUEZ PENIN, 2007)

2.1.3 Comunicaciones. El sistema de comunicaciones soporta el intercambio de información entre los elementos de planta, la arquitectura de hardware implementada y los elementos de gestión. Esto permite implementar el sistema de controladores que realizará el intercambio de información entre los elementos de campo (autómatas reguladores) y los ordenadores que realizarán la recopilación de datos de información (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

La conexión se realiza de dos maneras:

- Mediante controladores específicos
- Mediante controladores genéricos

2.1.3.1 Controladores específicos. “Son controladores que solo permiten la comunicación entre un elemento determinado de campo y un sistema de captación de datos (ordenador). Para cada enlace se hace servir un controlador determinado” (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

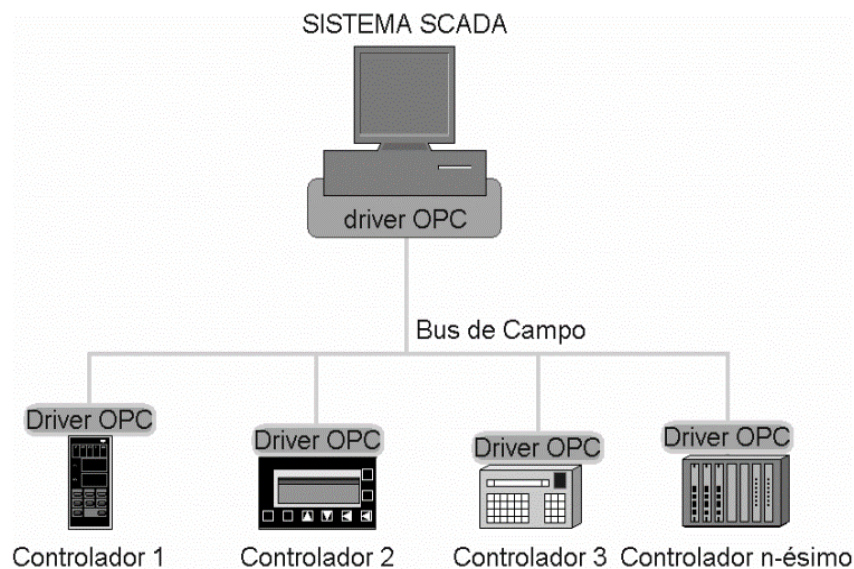


Fuente: Aquilino Rodríguez Penin

En la figura 3 se observa que cada enlace desde el sistema SCADA a cada elemento del campo es exclusivo. Si se utilizara un SCADA de otro tipo de fabricante se debería duplicar los enlaces con controladores específicos, también habría que añadir otro controlador específico si se quisiera comunicar los dos SCADA (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

2.1.3.2 Controladores genéricos. Son controladores de tipo abierto. Están hechos en base a unas especificaciones concretas y de dominio público, cuya idea básica es definir una interfaz estándar entre los elementos de campo y aplicaciones independientes del fabricante, simplificando así tareas de integración. El ejemplo más claro de controlador genérico es la tecnología OPC. (RODRÍGUEZ PENIN, 2007)

Figura 4. Controladores genéricos , OPC



Fuente: Aquilino Rodríguez Penin

“El ejemplo anterior se simplifica si cada elemento del sistema tiene una cara común. Ahora, añadir un elemento más al sistema SCADA no será mayor problema si se utiliza la misma interface (OPC en este caso) (RODRÍGUEZ PENIN, 2007).

2.2 Acondicionamiento de señales

Los acondicionadores de señal son conocidos también como adaptadores o amplificadores de forma general, son elementos presentes dentro de un sistema de medida que proporcionan un tipo de señal de cualquier sensor electrónico, que pueda ser

registrada, presentada o para ser procesada por intermedio de algún equipo o tipo de instrumento estandarizado (PALLÁS ARENY, 2003).

Se basa principalmente en varios circuitos electrónicos que brindan algunas funciones como: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación. En el caso de que alguna etapa de un tratamiento de señales de una medida digital, al tener un sensor analógico entonces es necesario instalar un convertidor A/D (analógico a digital). (PALLÁS ARENY, 2003)

2.2.1 *Interfaces, dominios y conversiones de datos.* En los sistemas de medición, las funciones de transmisión, acondicionamiento, procesamiento y presentación, no siempre esta asociada a algún elemento físico. El acondicionamiento y procesamiento en varias ocasiones es difícil definir su separación, por eso es fundamental realizar una acción directa en la señal del sensor previo a su utilización (PALLÁS ARENY, 2003).

El dominio de tipo analógico presenta información en su amplitud, puede ser de corriente, carga, tensión o en forma de potencia. Estas señales se diferencian de las digitales ya que las amplitudes presentan información temporal, mientras que las digitales se observa directamente en dos niveles (PALLÁS ARENY, 2003).

2.2.2 *Tipos de sensores.* Existe una gran variedad de sensores que miden distintas magnitudes físicas, por tanto es necesario conocer como se clasifican en base a ciertos criterios. Según (PALLÁS ARENY, 2003) los sensores se clasifican de la siguiente manera.

Tabla 1. Clasificación de sensores

Clasificación de sensores		
Criterio	Clases	Ejemplo
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

Fuente: Ramón Pallas

2.3 Medición de flujo

La medición de flujo es esencial en el interior de una organización en la que se utilicen fluidos para numerosos procesos y aplicaciones, ya que obtener un valor erróneo en términos de medición no es beneficioso para la empresa, entonces la medición de flujo no es más que la capacidad de medir velocidad, el flujo másico, el flujo volumétrico referente a cualquier gas o líquido utilizado en la industria (MOTT, 2006).

Medir adecuadamente un flujo de cualquier tipo que este sea es primordial y de mucha importancia para poder realizar el control adecuado en los distintos procesos de tipo industrial, realizando varias transferencias de datos al realizar una vigilancia continua de los mismos, de este modo poder analizar y evaluar progresivamente varias características dentro de los sistemas en los que estén inmersos los fluidos en movimiento.

Se pueden utilizar tres tipos de medidores para flujo que son, medidores de carga variable que utiliza la diferencia de presión entre dos puntos por la restricción de la corriente de fluido, medidores de área variable que miden el fluido debido al arrastre dinámico sobre el flotador y el medidor de flujo de turbina que capta las revoluciones a través de una bobina magnética.

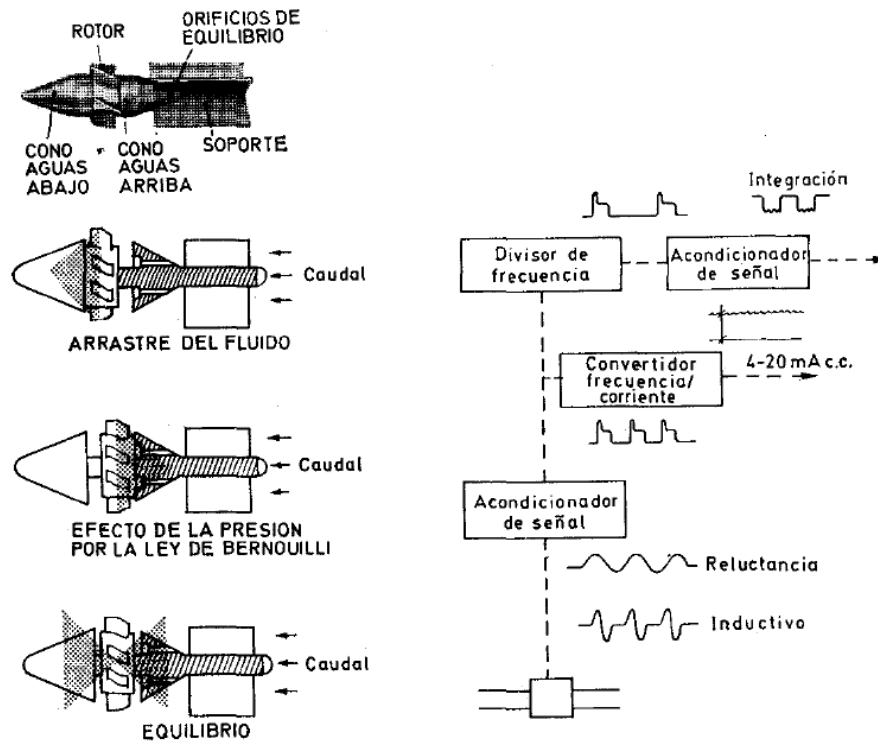
2.3.1 Medidor de flujo de turbina. El rotor dispuesto en este tipo de medidor gira a la velocidad provista por el flujo volumétrico, al mismo tiempo cada vez que alguno de los álabes del rotor pase por una bobina magnética va a generarse pulsos de voltaje que ingresan a un contador electrónico, un medidor de frecuencia o algún otro dispositivo que cumpla con las mismas características de lectura, con el fin de convertirlas a flujo volumétrico (MOTT, 2006).

La velocidad del fluido desciende por el principio Bernoulli al atravesar la turbina, aumenta la presión aguas abajo de la turbina, y como consecuencia se ejerce una fuerza igual y opuesta a la del flujo aguas arriba, lo que mantiene en equilibrio hidrodinámico el rotor. (CREUS SOLÉ, 2010)

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. El de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través

del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varia la reluctancia del circuito magnético, esta variación cambia el flujo, induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto, es proporcional al giro de la turbina. (CREUS SOLÉ, 2010)

Figura 5. Medidor de flujo tipo turbina



Fuente: Antonio Creus Solé

En el de tipo inductivo poco usado actualmente, el rotor lleva incorporado piezas magnéticas y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En ambos casos los pulsos y la frecuencia que genera el rotor de la turbina es proporcional al caudal. La turbina está limitada por la viscosidad del fluido. En general para viscosidades superiores a 3-5 centistokes se reduce considerablemente el intervalo de medida del instrumento.

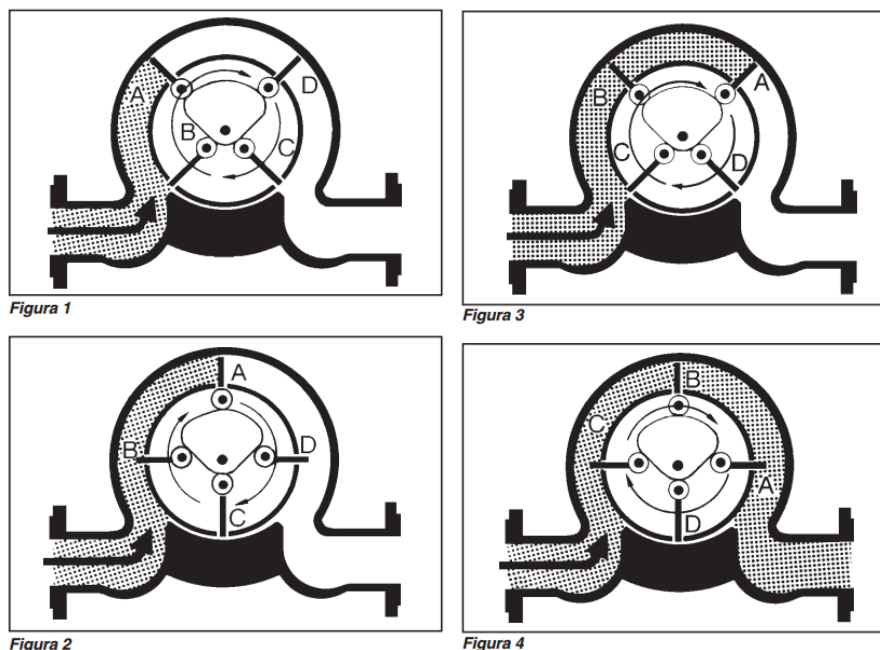
Las tasas de flujo pueden variar desde 0,02 L/min (0,005 gal/min) hasta varios miles de L/min o gal/min. La precisión es bastante aceptable, va del orden de $\pm 3\%$ y se consigue en un fluido de tipo laminar en una línea recta.

2.3.2 Medidor de desplazamiento positivo. La carcasa está diseñada de forma precisa, contiene al rotor que gira sobre rodamientos de pequeñas bolas, estos rodamientos están unidos a pequeños álabes dispuestos de forma equitativa.

Al empezar a circular líquido a través del medidor, el rotor y los álabes o paletas giran alrededor de una leva fija, produciendo que las paletas se desplacen de adentro hacia afuera. Estos movimientos consecutivos de los álabes crean una cámara de medición de fluido de volumen exacto entre alabe y alabe (FMC-TECHNOLOGIES, 2006).

Según (FMC-TECHNOLOGIES, 2006) cada rotación produce continuamente cámaras cerradas de fluido. Ni los álabes, rotor y carcasa hacen contacto entre sí. Además que el flujo pasa sin tener perturbaciones durante las mediciones, esto a su vez ahorra energía al no girar de forma innecesaria. La siguiente figura muestra de forma rápida cómo funciona el medidor de desplazamiento positivo de aspas deslizantes.

Figura 6. Principio de operación



Fuente: FMC Technologies

- La primera figura muestra el fluido no medido ingresando al medidor. El rotor y los álabes giran en sentido horario. Los alabes A y D se encuentran totalmente extendidos, formando la cámara de medición (FMC-TECHNOLOGIES, 2006).

- La segunda figura muestra como los álabes y rotor han realizado un octavo de giro completo. La paleta A esta extendida completamente mientras que B lo está de forma parcial (FMC-TECHNOLOGIES, 2006).
- En el tercer gráfico realiza un cuarto de giro. El álabe A todavía está extendido y B también, creando un volumen exacto, conociendo la cantidad de líquido que se encuentra en la cámara (FMC-TECHNOLOGIES, 2006).
- La última figura muestra al fluido que se ha medido saliendo del medidor. A su vez que esta por formarse nuevamente otra cámara de medición entre las paletas C y B. En tres octavos de giro se han generado dos cámaras y una tercera por formarse. este ciclo se repite indefinidamente mientras exista líquido en el sistema.

Este tipo de medidor puede tener un receptor de señales o a su vez puede enviar de forma directa el movimiento de los álabes a un bloque de engranajes que hacen funcionar el registrador de forma mecánica.

2.3.3 Factores que influyen en la medición de flujo. Existen diversos tipos de elementos o dispositivos que se emplean para medir flujo, todo depende en que aplicación o proceso se encuentre, entre estos podemos contar con medidores de volumen que lo hacen de forma directa y otros que lo miden en forma aproximada mediante la velocidad promedio de dicho flujo y lo transforma a un flujo volumétrico por medio de $Q = Av$. (MOTT, 2006).

Varios dispositivos pueden proporcionar mediciones primarias directas, mientras que existen otros tipos que lo pueden hacer mediante una calibración o aplicando un coeficiente de descarga a la salida observada en el instrumento de medición, hay que considerar también que la forma de salida que tiene el medidor pueden ser distintos comparados con otros tipos (MOTT, 2006).

A tomar medidas se debe tomar en cuenta que dicha lectura se puede producir por presión, de algún contador mecánico, por el nivel del fluido, por la posición del indicador inmerso en la corriente del fluido y señales eléctricas continuas o una cantidad de pulsos eléctricos, por esta razón para seleccionar de manera adecuada un medidor de flujo con

su respectivo indicador se deben verificar y tomar en cuenta los distintos factores presentes (MOTT, 2006).

2.3.3.1 Rango. En la actualidad se pueden encontrar en el mercado medidores de caudal de unos pocos mililitros por segundo (mL/s) utilizados para tomas precisas, de igual forma existen también para medidas de varios miles de metros cúbicos, utilizados por ejemplo para regadío y sistemas que utilizan los GAD para la distribución de agua potabilizada.

Para lo dicho anteriormente se debe conocer el orden del flujo volumétrico que se vaya a medir, es decir se debe conocer todo el rango de las variaciones esperadas. El término que se emplea comúnmente en temas de medición de caudal es la “vuelta”, que es la relación de flujo volumétrico máximo que el instrumento puede medir al flujo mínimo que este puede detectar. (MOTT, 2006)

2.3.3.2 Exactitud requerida. De forma virtual los dispositivos de medición de flujos que se instalen y a su vez funciones de forma adecuada comprende con una exactitud equivalente al 5% de su flujo real. También hay que tomar en cuenta que esto no es un valor global ya que existen diversos dispositivos que poseen exactitudes mayores que pueden llegar incluso al 0,5%, esto dependerá considerablemente del costo y la calidad del mismo (MOTT, 2006).

2.3.3.3 Pérdida de presión. Se produce debido a distintos tipos de construcción que se emplea en medidores, al circular el flujo por los instrumentos se producen considerables pérdidas de energía. Existen unos cuantos que están exentos, la pérdida en se produce porque el dispositivo se coloca en una restringiendo el paso del fluido interferido al paso libre del mismo.

2.3.3.4 Tipo de indicación. Los factores por considerar al elegir el tipo de indicación de flujo incluyen si el control automático va a actuar sobre la salida, si el operador necesita vigilar esta y si existen condiciones ambientales severas. (MOTT, 2006)

2.3.3.5 Tipo de fluido. El correcto funcionamiento de los medidores de flujo se ven directamente afectados por las diversas propiedades que se encuentran en los fluidos y las

condiciones que estén presentes, es importante considerar si el fluido que circule por una instalación sea gas o líquido.

Además existen una variada cantidad de factores que influyen en el desempeño de los elementos como es el caso de la temperatura, viscosidad, conductividad eléctrica, corrosión, propiedades lubricantes y homogeneidad, tomando en consideración que existen medidores especiales dedicados para cada uno de estos.

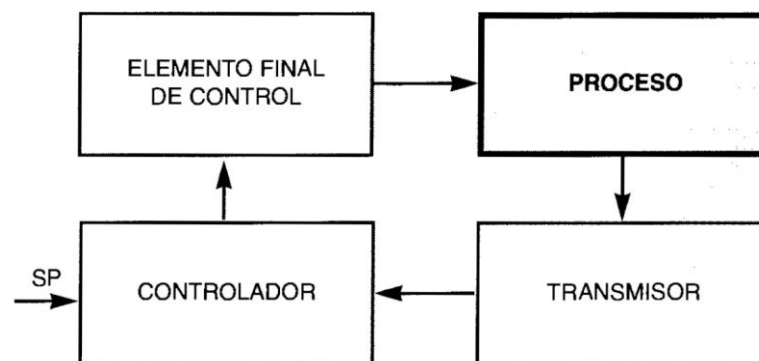
2.3.3.6 Calibración. Varios equipos de medición para flujo requieren una calibración previa a su funcionamiento, esto se lo puede hacer mediante tablas previstas por los fabricantes utilizando gráficos o también utilizando equipos más sofisticados con lecturas de toma directa con escalas previamente calibradas.

Se puede tomar en cuenta que la calibración hecha por el usuario del medidor use otro dispositivo o elemento de medición similar, por ejemplo usar un medidor de presión estándar solo para comparar cierta lectura con la obtenida con el elemento calibrado y verificar valores para posteriormente realizar un reajuste.

2.4 Control automático

Para empezar e debe conocer el concepto de proceso, que visto desde la perspectiva de producción es aquel lugar donde se utiliza como medio, la energía y materia tratados o transformados para obtener un producto. Desde otro punto de vista, un proceso específicamente es un bloque en el que se pueden observar desde una o varias variables de salida en las que es fundamental conocer y mantener dichos valores.

Figura 7. Bloques que componen un control básico



Fuente: Acebedo Sánchez

2.4.1 *Controlador automático.* Existen diversos tipos de aparatos que son controladores y se pueden observar en nuestra vida cotidiana, como por ejemplo al conducir un vehículo podemos controlar su velocidad con el acelerador y el freno, interruptores en nuestra habitación. Pero requieren ser accionados por el elemento humano ya que por sí solo el elemento final en el caso del vehículo no es capaz de medir la velocidad (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006).

Lo primero a tomar en consideración dentro de un control automático es conocer el valor de la variable que se va a controlar. De esta manera lo que hace el controlador automático es realizar la conexión entre entrada y salida mediante algún algoritmo de control. Este sistema lo que hace es medir la variable y actuar sobre el sistema para que se mantenga dicha variable en un valor deseado o de referencia (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006).

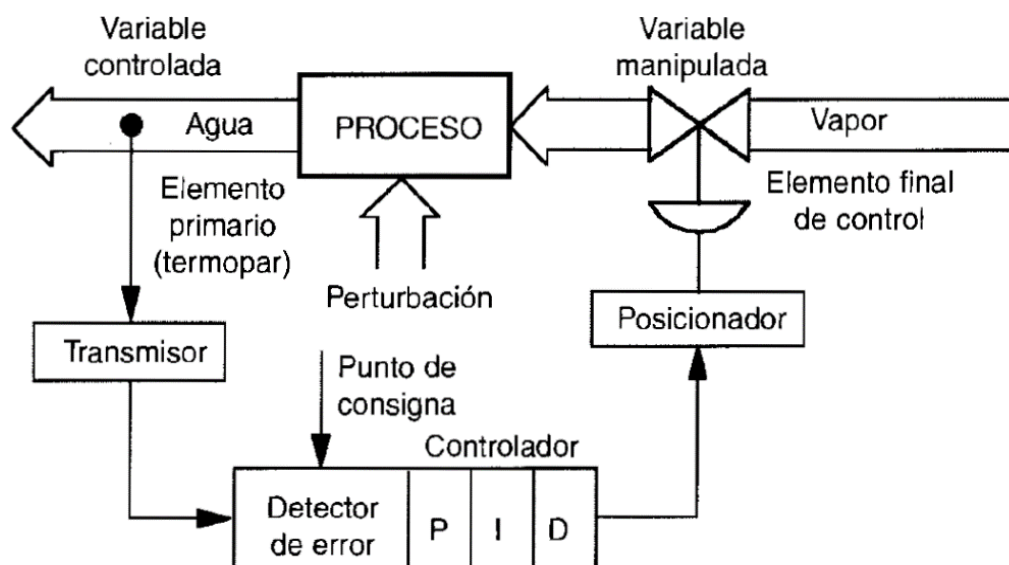
Un controlador automático al detectar que la variable no se encuentra en el punto deseado, aplica inmediatamente una corrección al proceso. Mide nuevamente el efecto producido por la primera corrección y aplica una segunda, y así sucesivamente. Es decir que el controlador mide y corrige continuamente el sistema.

2.4.2 *Lazo abierto.* El control realizado en lazo abierto no realimenta la información del proceso al controlador. Como tal es mínima su utilización hoy en día dentro de las industrias para el control de procesos.

Un ejemplo claro está en válvulas automáticas actuadas de forma manual o motorizadas con mandos a distancia, pero que no contengan ningún tipo de sistema de realimentación al sistema de control, estas posiciones las las varía netamente el operador. (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006)

2.4.3 *Lazo cerrado.* Toda la información de las variables dentro del proceso es captada mediante un sistema de medición apropiado que utiliza como entrada al controlador. Un dispositivo instalado detecta este error y hace una comparación con la señal de entrada con otra referencia que representa la concisión deseada, de esta manera el controlador genera una señal de salida para tratar de corregir este error (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006).

Figura 8. Diagrama de bloque ,lazo cerrado



Fuente: Acebedo Sánchez

La señal de salida del control se aplica al elemento final de control, el cual manipula una entrada en la dirección adecuada para que la variable controlada retorne a la condición deseada. Este circuito cerrado proporciona un esfuerzo continuo para mantener la variable controlada en la posición de referencia o punto de consigna. (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006)

Según (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006) , aparecen tres tipos de variables asociadas al control:

- **Variable controlada (CV).** Se refiere a la característica de calidad o cantidad que se mide y controla en cualquier tipo de sistema en el que es necesario mantener valores constantes. Dicha variable es una característica del medio controlado, actuando sobre la materia o energía sobre la cual se encuentra situada la variable controlada.
- **Variable manipulada (MV).** Es la cantidad o condición de materia o energía que modifica el controlador automático dentro de un sistema para que el valor de la variable controlada resulte afectado en la proporción debida. La variable manipulada es una condición o característica de la materia o energía que entra al proceso.

- **Variable de perturbación (DV).** Toda a aquella variable que tiene influencia sobre la variable controlada pero que no puede ser modificada de forma directa por la variable manipulada. Dicho de otra forma el sistema debe esperar la respuesta en la salida de proceso para realimentar esa información y poder realizar la acción requerida sobre la variable manipulada.

2.4.4 *Elementos de un lazo de control automático.* Según (ACEBEDO SÁNCHEZ, 2006) los principales elementos dentro de un lazo de control se clasifican de la siguiente forma.

- **Sistema de medición.** Son aquellos elementos utilizados para determinar y comunicar al sistema de control el valor de la variable controlada, o variable de proceso.
- **Elemento primario.** Parte del sistema de medición que transforma energía del medio controlado para producir un efecto como respuesta a cualquier cambio en el valor de la variable controlada. Dicho efecto puede ser un cambio en fuerza, presión, eléctrico o posición.
- **Sistema de control.** Están relacionados hacia la generación de acciones correctivas, dicho sistema compara variables del proceso en el punto de consigna y detecta el error, inmediatamente la acción correctora se genera en función del error mediante el algoritmo del control correspondiente.
- **Unidad de potencia.** Parte del sistema de control, que mediante una señal eléctrica enviada desde la tarjeta de adquisición de datos, inmediatamente aplica energía para accionar un elemento final de control. Como elemento final de control se puede tener una válvula electroneumática.
- **Unidad final de control.** Es la parte final de un sistema de control que se encarga de modificar de forma directa el valor de la variable manipulada dentro de un proceso. Generalmente se nombra el elemento final de control como conjunto de unidad de potencia. La unidad de potencia controla el elemento de control por medio de señales enviadas desde el sistema de control.

2.5 Control PID

Al realizar una realimentación dentro de un sistema se pueden reducir efectos varios efectos que se producen al existir perturbaciones, de esta forma el sistema tratara de seguir al pie de letra las señales que se emiten en la entrada. Esto produce como beneficios grandes avances dentro de varios campos como lo es el control, campos de comunicación e instrumentación.

El control PID se implementa en base a la realimentación de datos obtenidos en procesos o aplicaciones. Es capaz de eliminar varios errores en estado estacionario mediante una acción integral y puede anticipar el futuro mediante una acción derivativa. El dinamismo que se presentan en los procesos es benigno, por tal motivo el control PID o controladores PI satisfacen esta necesidad de cumplir con los requisitos para controlar dicho comportamiento (ASTROM, y otros, 2009).

El control PID se lo considera como el algoritmo de control más comúnmente utilizado en la industria. Ya que en la mayoría de lazos de realimentación, se los controlan utilizando este algoritmo u otro con variaciones pequeñas. Este control es esencial y un elemento clave en sistemas distribuidos para realizar control de procesos. Estos controladores también pueden ser utilizados para sistemas de control especiales (ASTROM, y otros, 2009).

2.5.1 Controlador PID. La fórmula general del controlador PID está dada por la unión de tres términos independientes (PID), cada una de las acciones cuenta con su propia fórmula de cálculo, cumpliendo independientemente funciones distintas. Además que la fórmula cuenta con parámetros que se encuentran presentes en la forma de onda que se presente.

El algoritmo PID está determinado por la unión de tres fórmulas independientes y se puede describir como:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

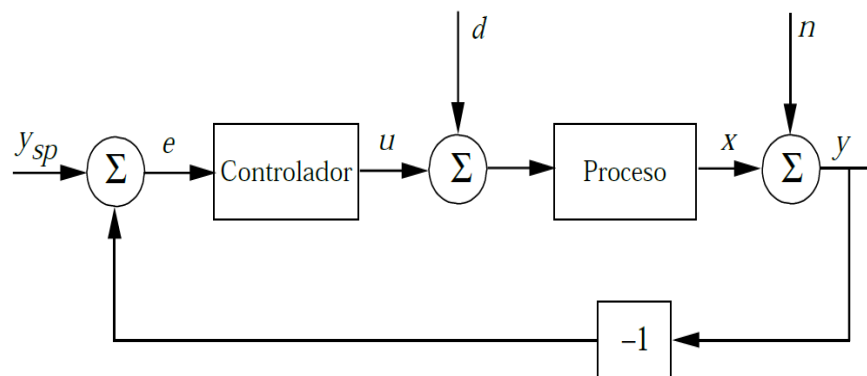
Donde u es la señal de control y e es el error de control ($e = y_{sp} - y$). La señal de control es así una suma de tres términos:

- El término-P (que es proporcional al error)
- El término-I (que es proporcional a la integral del error)
- El término-D (es proporcional a la derivada del error)

Los parámetros de control son:

- K (es la ganancia proporcional)
- T_i (es el tiempo integral)
- T_d (es el tiempo derivativo)

Figura 9. Diagrama de bloques de un lazo de realimentacion simple



Fuente: Astrom y otros

2.5.1.1 Acción proporcional. La ecuación dada para el control proporcional (P) puro se obtiene a partir de la ecuación general y esta se simplifica.

Esta fórmula queda de la siguiente manera

$$u(t) = Ke(t) + ub \quad (2)$$

La acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable u_b es una polarización o un reset. Cuando el error (e) de control es cero, la señal de control toma el valor de $u(t) = u_b$. La polarización u_b a menudo fija a $(u_{max} + u_{min})/2$, pero puede algunas veces ajustarse manualmente de forma que el error de control estacionario es cero en un punto de consigna dado. (ASTROM, y otros, 2009)

2.5.1.2 Acción integral. Su principal función está es asegurarse que la salida del proceso deba coincidir con el punto de consigna en estado estacionario. Con este tipo de control normalmente existe un error de control en estado estacionario. Tomando en cuenta que con dicha acción integral, un mínimo error producido conduce siempre a una señal creciente de control, de la misma forma una señal negativa generara una señal decreciente esto sin tomar en cuenta lo pequeño que pueda ser el error (ASTROM, y otros, 2009).

Según (ASTROM, y otros, 2009) el error en estado estacionario siempre será cero con acción integral. Suponiendo que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante (u_0) y un error constante (e_0). La señal de control está dada por

$$u_0 = K(e_0 + \frac{e_0}{T_i}T) \quad (3)$$

Según (ASTROM, y otros, 2009) la acción integral se visualiza también como un dispositivo que se resetea automáticamente, un controlador con acción integral siempre botara error de valor cero en un estado estacionario.

2.5.1.3 Acción derivativa. El principal objetivo de este control es tratar de mejorar la estabilidad dentro de un lazo cerrado, a causa de la dinámica del proceso, llevará algún tiempo antes de que un cambio en la variable de control sea detectable en la salida de proceso.

De esta manera el sistema de control tardará en corregir el error producido al avanzar el proceso, la acción de un controlador con acción proporcional y derivativa se puede interpretar como si el control se hiciese proporcional a la salida predicha del proceso, donde la predicción se hace extrapolando el error por la tangente a la curva del error. (ASTROM, y otros, 2009)

La estructura básica de un control PD es

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

Un desarrollo e serie de Taylor de $e(t + T_d)$ da

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

2.5.1.4 Características control PID. Un controlador proporcional (kp) tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida y reducirá pero nunca eliminará el error de estado estacionario. Un control integral (ki) tendrá el efecto de eliminar el error de estado estacionario, pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo (kd) tendrá el efecto de aumentar la estabilidad del sistema, reduciendo el exceso, y la mejora de la respuesta transitoria (NATIONAL-INSTRUMENTS, 2014).

Tabla 2. Efectos de los controladores PID

Respuesta LC	Tiempo de subida	Sobre impulsos	Tiempo de estabilización	Error EE
kp	Disminución	Incrementar	Pequeño cambio	Disminución
Ki	Disminución	Incrementar	Incrementar	Eliminar
kd	Pequeño cambio	Disminución	Disminución	Pequeño cambio

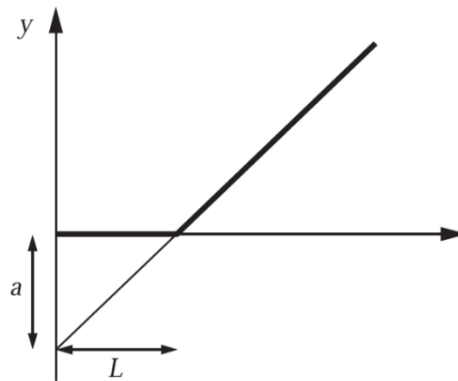
Fuente: National Instruments

2.5.2 Método de Ziegler-Nichols. Los métodos creados por Ziegler y Nichols en el año 1942 para determinar parámetros de controladores PID, hoy en día son muy utilizados de forma original y también realizada algunas modificaciones. Utilizado en gran variedad de aplicaciones dentro de la automatización y control.

Dichos métodos están basados en la determinación de varias características relacionadas directamente con la dinámica del proceso dentro de su campo de aplicación. Estos métodos son la base para el diseño y creación de controladores utilizados en la industria para el control de procesos.

2.5.2.1 Método de la respuesta en escalón. Primer método presentado, que se basa en obtener información del proceso en la forma de la respuesta a un escalón en lazo abierto. Dicha respuesta a un escalón se caracteriza por tener dos parámetros a y L (ASTROM, y otros, 2009).

Figura 10. Caracterización de la respuesta en escalón



Fuente: Fuente: Astrom y otros

En primer lugar se determina el punto donde la pendiente de la respuesta a un escalón tiene su máximo y se dibuja la tangente en este punto. Las intersecciones entre la tangente y los ejes de coordenadas dan los parámetros a y L . Esto corresponde a modelar un proceso por un integrador y un retardo de tiempo. (ASTROM, y otros, 2009)

Tabla 3. Parámetros para método respuesta escalón

Controlador	aK	T_i/L	T_d/L	T_p/L
P	1			4
PI	0,9	3		5,7
PID	1,2	2	$L/2$	3,4

Fuente: National Instruments

LabVIEW perteneciente a la National Instruments ofrece sus usuarios la facilidad de utilizar este método, herramienta muy utilizada para aplicaciones donde sea necesario el control PID.

CAPÍTULO III

3. SITUACIÓN PREVIA Y MEJORA POTENCIAL

La propuesta realizada en este trabajo de titulación va encaminada a realizar una mejora potencial a un módulo de pruebas para medición y control de flujo, el cual fue entregado al laboratorio de control de la Facultad de Mecánica como tema de tesis en el año 2006, su utilización hoy en día es casi nula ya que requiere de elementos fundamentales para su funcionamiento.

El propósito principal es reacondicionar el banco de pruebas para medición y control de flujo y hacer que funcione nuevamente, no solo podrá realizar las funciones originales, sino que además se añadirán otros dispositivos que brinden situaciones de mejora en la experiencia de uso y desarrollo de conocimientos para el estudiante.

La función principal del banco de pruebas consiste en bombear líquido a través de una línea recirculante, en la que se toma medidas de las variables presentes a través de los instrumentos de medición. Con la ayuda de la tarjeta de adquisición de datos instalada y por medio de los transmisores electrónicos, se puede tomar lecturas y visualizarlas en el computador.

El control se lo realiza a través de una tarjeta de adquisición de datos conjuntamente con el ordenador. Las señales analógicas que se adquieren por medio de los transmisores ingresan a la tarjeta para posteriormente ser tratadas por el software instalado previamente en el ordenador, luego por medio de las salidas analógicas de la tarjeta se envían señales a los actuadores para que regulen el sistema.

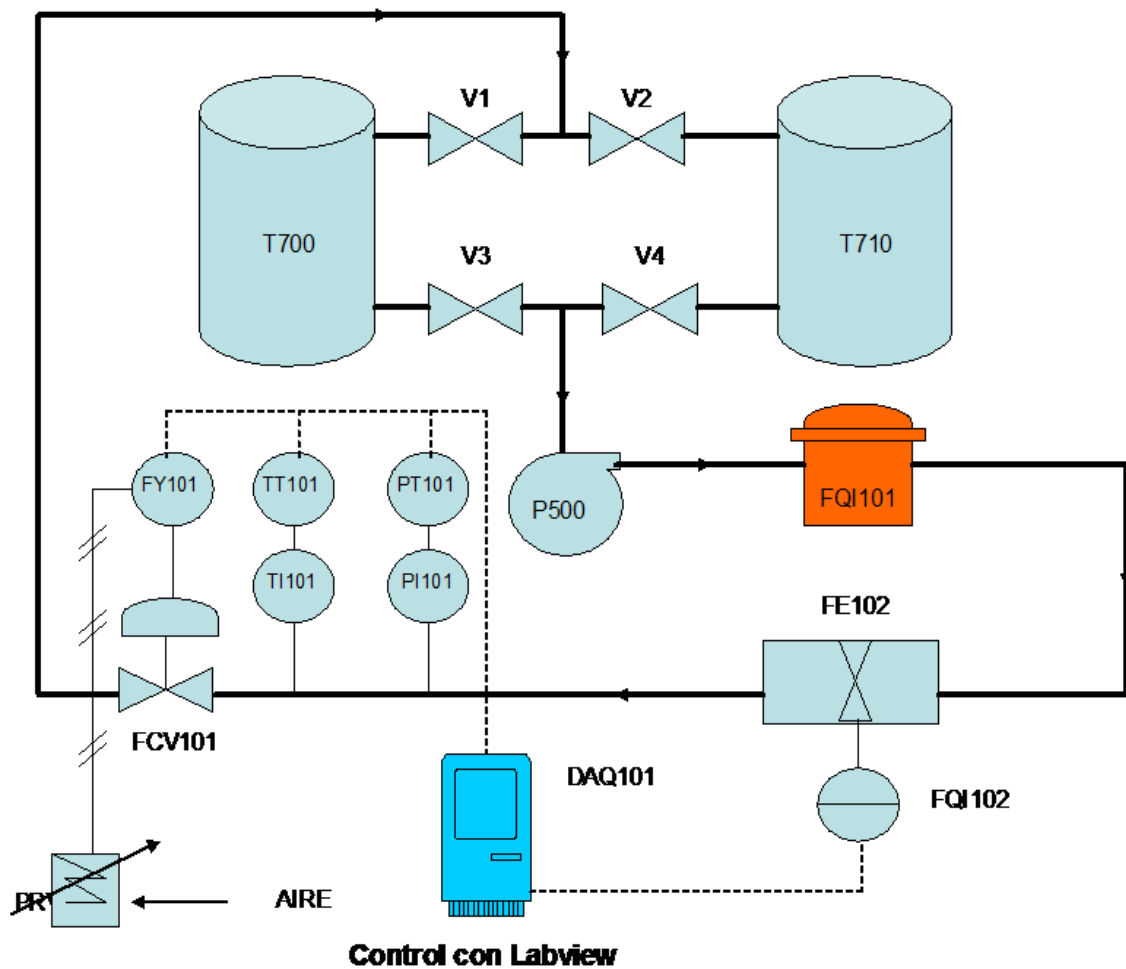
Las perturbaciones que se realizan en el sistema son generados de forma manual por una válvula de esfera, dichas perturbaciones son necesarias para generar una pequeña desestabilización en el sistema. Lo que se quiere cambiar es el modo manual a uno de tipo automático, por lo que se ve la necesidad de instalar una bomba centrífuga trifásica conjuntamente con un convertidor de frecuencia, esto para poder variar la velocidad y generar dichas perturbaciones directamente desde el computador.

3.1 Diseño original del sistema

El banco de pruebas para medición consta de varias partes que están representadas en un diseño inicial, para cumplir con una secuencia dentro de un lazo cerrado como es, trasladar fluido desde un tanque de almacenamiento por medio de una bomba centrífuga a través de una línea donde se encuentran instrumentos de medición de flujo, el mismo que es controlado por una válvula proporcional neumática y así retornar nuevamente el fluido a los tanques de almacenamiento para repetir el ciclo.

El diseño a continuación muestra como está constituido el sistema original, el cual posteriormente se le añadirá unos cambios para el mejoramiento, de esta manera, cumpla con las expectativas propuestas en el presente trabajo de titulación.

Figura 11. Esquema original banco de pruebas



Fuente: Mancero Orozco y Villacís Bonilla

3.1.1 Partes que constituyen el proceso original

- Tanques para almacenamiento de fluido
- Sistema de bombeo
- Medidores de flujo
- Indicadores de presión y temperatura
- Transmisores de , presión , temperatura y flujo
- Medidor de flujo INVALCO, Adquisición de datos
- Válvula para el control

Figura 12. Estado previo del banco de pruebas



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

3.1.2 *Funciones de cada una de las partes*

- **Tanques para almacenamiento.** Su función principal es contener el fluido a utilizarse en el proceso. Cada uno de los tanques puede almacenar fluido con una cantidad aproximada a 90 galones. La parte inferior de los recipientes esta provista de salidas conectadas entre sí, que proveen de fluido al sistema por medio de una bomba centrífuga, mientras que en la parte superior dos entradas individuales para el retorno.
- **Sistema de bombeo.** Está conformado por una bomba centrífuga de 2HP, este equipo de bombeo de baja potencia cumple el rango dispuesto para que los dispositivos de medición de flujo e indicadores puedan funcionar con normalidad cuando se ejecute el proceso, la succión y descarga de la bomba tiene 2 plgs, así como las líneas de tubería instaladas.
- **Medidores de flujo.** Se encuentran instalados dos medidores de flujo, uno tipo turbina y otro de desplazamiento positivo.

El medidor de turbina de marca FMC (Invalco), tiene un rango para medir el fluido de 30 a 330 galones por cada minuto, esto a una presión máxima de trabajo de 20 bar. Este medidor tiene un sensor de tipo inductivo roscado en la parte superior, que envía señales hacia un totalizador de flujo, el totalizador muestra la taza de fluido que atraviesa la línea y cuantifica la cantidad de líquido durante tiempos determinados.

El medidor de flujo de desplazamiento positivo Modelo T-11 de marca Smith, está instalado para una capacidad de 100 galones por cada minuto en un rango intermitente, 80 galones por minuto en un rango continuo, además que puede soportar los 150 psi.

- **Indicadores.** Marcan las variables de presión, temperatura y caudal, de tal forma que se puede observar sus valores en el propio instrumento, se cuenta con dos manómetros de presión, un termómetro y un medidor de paletas de desplazamiento positivo.

- **Transmisores.** Elementos electrónicos que tienen como finalidad transmitir señales generadas en un proceso hacia un colector de datos. El banco de pruebas cuenta con tres transmisores, uno para temperatura, presión y también para mediciones de flujo a través del medidor de turbina. El colector en este caso se trata de una tarjeta de adquisición de datos que es fundamental para realizar todas las acciones de control en el sistema.
- **Adquisición de datos.** Esencial dentro del banco de pruebas para medición y flujo, encargado de adquirir todas las señales generadas por los transmisores. Las señales adquiridas en forma de pulsos eléctricos por medio de la tarjeta ingresan a un programa previamente diseñado en LabVIEW, de esta manera se envían órdenes por medio de la misma tarjeta hacia la válvula que realiza el control.
- **Válvula de control.** Considerado como el elemento final de control, que en conjunto con el programa desarrollado en LabVIEW y por medio de la tarjeta NI DAQ-6009, es la encargada de regular el paso de fluido que atraviesa por la línea, de tal forma que mantiene estable al sistema. Esta válvula proporcional de marca Fisher de 2 plgs es accionada a través de un transductor electroneumático.

3.1.3 *Principales elementos físicos que posee*

3.1.3.1 *Equipos*

- 1 Bomba centrífuga de 2HP
- 2 Tanques para almacenamiento
- 1 Medidor tipo turbina
- 1 Medidor de desplazamiento positivo
- 1 Válvula proporcional neumática

3.1.3.2 Instrumentos

- 1 Indicador de temperatura
- 2 Indicadores de presión
- 1 Transmisor de presión
- 1 Transmisor de temperatura
- 1 Transductor electroneumático
- 1 Totalizador Invalco
- 1 Tarjeta de adquisición de datos

3.1.3.3 Accesorios

- 3 Tubos Galvanizados de 2"x 6 m
- 3 T de 2"
- 9 Codos de 2"
- 5 Universales de 2"
- 1 Válvula check
- 4 Válvulas de esfera de 2"
- 4 Bridas RF de 2X150 ANSI
- 4 perfiles "G"

3.2 Propuesta para mejora del banco de pruebas

Al realizar un análisis previo de la situación actual del banco de pruebas para medición de flujo y control, se determinaron varios aspectos, tanto positivos como negativos. A simple vista no se pudo observar anomalías ni desperfectos en la instalación y montaje, pero al realizar una observación más profunda se pueden encontrar desperfectos en varios puntos.

Cada uno de los elementos se revisó minuciosamente para encontrar algún tipo de desperfecto, principalmente fugas en el sistema. Los transmisores, transductores y medidor de turbina se comprobaron uno a uno con la ayuda de la tarjeta de adquisición de datos, esto después de haber comprobado conductividad del cableado con un multímetro.

A continuación se muestra una descripción de las condiciones en que se encontraron todos los equipos, instrumentos y accesorios que posee el banco de pruebas para medición y control de flujo, es decir como se encontró el banco de pruebas antes de cualquier intervención. Además se describirá cada una de las reparaciones o mejoras para cada uno de los casos mencionados.

3.2.1 *Tanques de almacenamiento*

- **Estado previo.** Después de haber pasado casi once años desde su puesta en funcionamiento no se ha realizado ningún tipo de mantenimiento, por lo que se encontraron a los tanques de almacenamiento deteriorados, completamente oxidados en su interior producto de la corrosión, además de agua putrefacta en el todo el sistema.

La construcción de los tanques de almacenamiento se realizó en acero negro, material no apropiado para almacenar agua. Por tal motivo se produjo una corrosión agresiva, este deterioro también pone en riesgo todos los elementos tales como bomba centrífuga, contador de galones de paletas, medidor de turbina, sensor de presión, termómetro y la válvula proporcional neumática.

Figura 13. Tanques de almacenamiento deteriorados



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- **Mejora potencial.** Después de haber realizado todas las revisiones pertinentes se decide cambiar los dos tanques de almacenamiento por uno solo, este tanque será de material plástico para evitar la corrosión. El tanque será capaz de proveer de fluido para alimentar todo el sistema sin que éste quede vacío, de esta manera se obtendrá un sistema mas eficiente.

Como segundo propósito se toma en cuenta el espacio físico que ocupan los tanques metálicos en el laboratorio. Al ser sustituidos por un solo tanque, se libera gran parte de espacio, ayudando a la movilidad y desplazamiento alrededor del banco de pruebas, mejorando la ergonomía y por tanto facilita el mantenimiento teniendo acceso a todos los puntos.

3.2.2 *Bomba centrífuga*

- **Estado previo.** Al revisar el estado de la bomba centrífuga se observó que se encuentra en buenas condiciones. Este equipo tiene una potencia de 2HP que provee de caudal de forma constante al sistema, se enciende manualmente con un interruptor mecánico.

La bomba tiene un motor eléctrico para alimentación monofásica, esto impide que pueda ser utilizada mediante un convertidor de frecuencia, puesto que no está diseñado para conexión trifásica. El convertidor es necesario para variar la velocidad del motor de la bomba, permitiendo ajustar el caudal.

- **Mejora potencial.** Para crear perturbaciones en el caudal, el módulo solo cuenta con una válvula de esfera instalada en la parte superior donde se produce la descarga, estas perturbaciones son necesarias para que el control PID programado en el computador realice las acciones necesarias para mantener el sistema estable en relación a una variable.

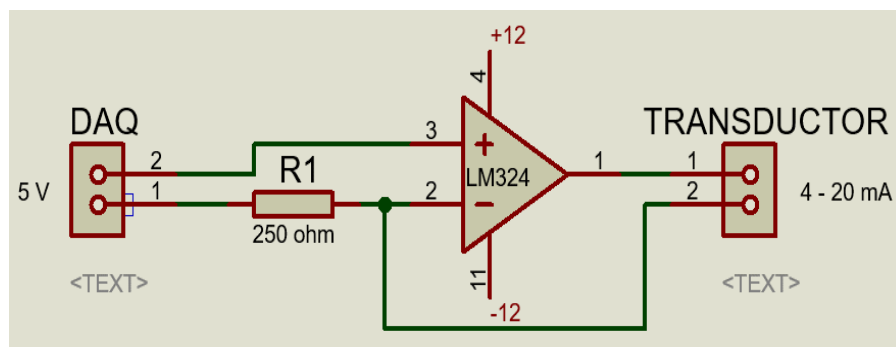
Lo que se propone es eliminar el uso de esta válvula de esfera para dejar de manipular el sistema de forma manual. La variación del caudal se lo realizará de forma automática, utilizando de forma directa la bomba centrífuga. Esto se logra variando la velocidad de giro del motor eléctrico por medio de un convertidor de frecuencia.

El equipo actual no admite conexión trifásica, necesario para poder conectarlo al convertidor de frecuencia, por tal motivo se cambiará la bomba monofásica por una de tipo trifásico. Al realizar este cambio, el variador de frecuencia controlará las variaciones de caudal por medio del computador, lo que permite que el control general de todo el banco se lo haga desde un mismo punto.

3.2.3 Transductor electroneumático

- **Estado previo.** El transductor electroneumático es el encargado de proveer de presión a la válvula proporcional neumática, para que esta pueda ejercer movimiento lineal, es decir mueve el obturador de arriba hacia abajo, impidiendo o liberando el paso del fluido.

Figura 14. Circuito acondicionador de señal para transductor



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

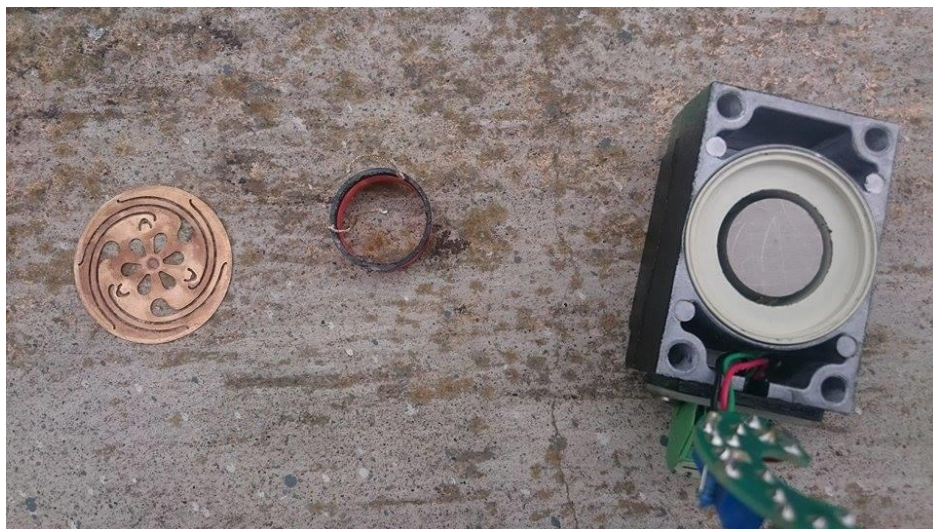
Al realizar las pruebas al transductor con la tarjeta de adquisición de datos, se observó que el instrumento había perdido su funcionalidad. La prueba se lo realizó utilizando un amplificador operacional para proveer de corriente entre 5 a 20 mA al transductor, como se muestra en la figura anterior.

Al querer acceder al transductor para verificar su estado, se presentaron problemas al momento de intentar sacar la tapa de protección, que protege las partes vulnerables del transmisor, al ser un elemento roscado este no giraba en ningún sentido porque se encontraba totalmente atascado.

Para acceder al transductor se procedió a realizar un corte de forma perpendicular a la parte roscada de la tapa, de esta manera se logró visualizar el interior de la cámara donde se encuentra la parte electroneumática del transductor. Al realizar un despiece completo del transductor en base al manual se encontró donde radicaba el problema principal de su falla.

El problema se detectó a simple vista en la sección donde se encuentra el conjunto imán permanente-bobina, encontrándose dos causas del problema. El obturador metálico que debía estar unido a la bobina del transmisor estaba completamente despegado, impidiendo que realice su función, que es el de obstruir o liberar el paso de aire en la boquilla.

Figura 15. Transductor neumático descompuesto



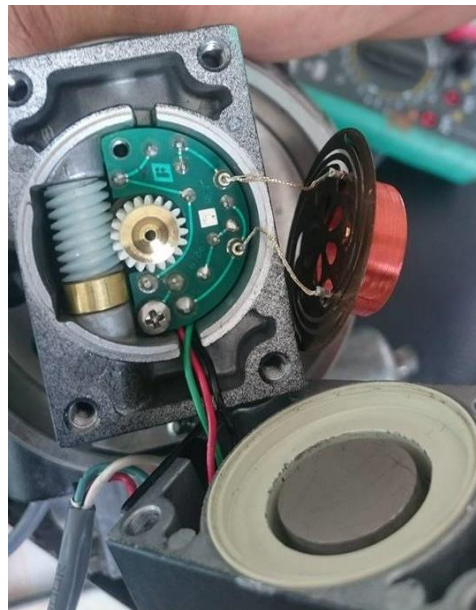
Fuente: Tierra D. & Zamora M.

El segundo problema se presentaba en los conductores que alimentan a la bobina en el circuito del transductor. Uno de estos estaba desoldado en uno de sus extremos impidiendo que la bobina genere el campo magnético necesario para el movimiento del obturador.

- **Reparación.** Al haber identificado previamente el estado del transductor, se procedió a realizar las reparaciones necesarias para que recupere su funcionalidad para el que fue diseñado. Estas reparaciones se lo hace en base a consultas realizadas previamente.

Primero se soldaron los conductores que conectan el bobinado a la placa del circuito, estos se encuentra colocados en el bloque de imán-bobina, en la parte superior del transmisor. Después se realizó la unión de la bobina al obturador metálico utilizando pegamento de secado rápido.

Figura 16. Reparación de transductor electroneumático



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Después se realizó pruebas de continuidad con un multímetro para verificar posibles desconexiones. Con el circuito acondicionador de señal diseñado para el transductor se ingresa corriente entre 4 y 20 mA a la bobina con mando de 0-5 V CD. El obturador unido a la bobina se mueve de forma lineal, producto de la repulsión magnética.

La tapa de protección al ser cortada para acceder al transductor, tuvo que ser soldada y rectificada a su forma original. La capsula metálica no puede tener desperfectos en su partes roscadas tanto en la base como en la tapa, para que se de ajuste e impermeabilidad entre ambas partes.

3.2.4 *Medidor de turbina*

- **Estado previo.** El medidor de turbina cuenta con dos partes fundamentales, las aspas de la turbina y el captador magnético. Antes de realizar las pruebas de funcionamiento se desmontó el medidor completamente para comprobar que no haya desperfectos de ningún tipo.

Figura 17. Desmontaje de medidor de turbina

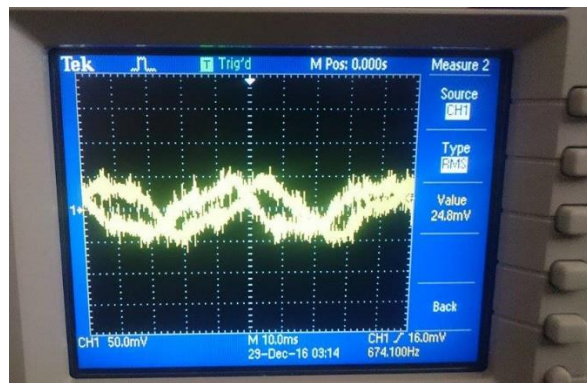


Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Primero se retiró el sensor roscado de la parte superior, a simple vista no presentaba ningún desperfecto físico. Las aspas del medidor se encontraban en muy buenas condiciones a pesar del tiempo de inactividad del banco de pruebas. Posteriormente se verificó continuidad en el cableado que transmite la señal de pulsos al tablero de control.

Luego se procede a realizar las pruebas de funcionamiento para verificar principalmente el estado del sensor de reluctancia magnética o pick up. Para esto se utiliza un osciloscopio que nos permite ver la forma de honda que emiten los pulsos a la vez que se puede observar las magnitudes eléctricas presentes en dicha honda.

Figura 18. Señal de onda emitido por pick up



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Al analizar la señal que emite el pick up instalado en el medidor de turbina, se observaron varios puntos importantes. Primero se ve que los pulsos emitidos no tienen una forma definida, también que todas las medidas no tienen una magnitud estable, por último la cantidad de voltaje que entrega es alrededor de 40V P-P, voltaje que la tarjeta de adquisición de datos no puede soportar.

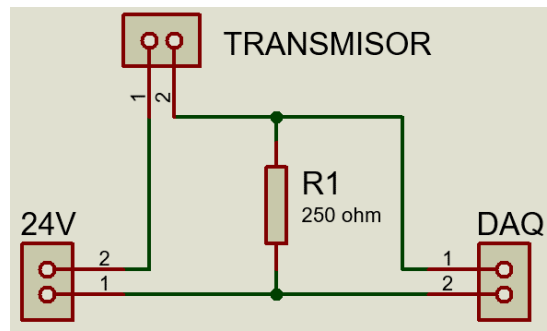
- **Mejora potencial.** Después de exhaustivas pruebas realizadas al medidor de turbina, no se logró obtener ningún tipo de señal estable que pueda ser utilizada para medir el caudal. Por tal motivo se procederá realizar el cambio inmediato de medidor de turbina por otro de similares características, pero que emita una señal de bajo voltaje necesario para conectarlo de forma directa a la DAQ.

El medidor de turbina deberá cumplir con las características necesarias para funcionar con normalidad cuando se ponga en marcha el banco de pruebas. El caudal que deberá registrar debe ser mayor a 170 l/min ya que es el valor que suministra la bomba centrífuga, además de soportar una presión máxima de 100 psi.

3.2.5 Transmisores

- **Estado previo.** Las señales generadas en los transmisores de presión y temperatura fueron estables. Al conectar cada uno de estos transmisores por medio de un circuito acondicionador a la tarjeta de adquisición de datos se pudo observar claramente como cambian las variables al encender la bomba centrífuga. El circuito utilizado es bastante básico y se muestra a continuación.

Figura 19. Acondicionador de señal para transmisores



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

En este caso se solo procederá a realizar reajustes a las partes que así lo requieran. De esta manera se logrará mejorar el aspecto visual, ergonómico, además de prevenir posibles fallos en el sistema, dando al usuario una mejor experiencia al momento de utilizar el módulo.

3.2.6 Tablero de control

- **Estado previo.** En el tablero de control se puede observar a simple vista muchas falencias en la disposición de todos de los elementos, además del cableado desordenado genera confusión y mal aspecto para el usuario. Las conexiones hacia los distintos componentes presentan solturas, desajustes de tornillos en algunas borneras y movilidad de los elementos.

Figura 20. Tablero de control con mal aspecto



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

El totalizador Invalco es la parte que más espacio ocupa dentro del tablero de control, su función es obtener las señales provenientes del medidor de turbina, tratar dicha señal para ser representada en la pantalla del totalizador. Los valores que se observan son, el total de galones y la tasa caudal.

- **Mejora propuesta.** El tablero de control se encuentra en una posición inadecuada, demasiado alejado del conjunto principal. Se retirará el tablero de su lugar original y será colocado en uno más estratégico, de esta manera todo el cableado del banco de pruebas utilizará un espacio más reducido, permitiendo el paso libre de las personas por toda el área circundante.

Luego de haber cambiado el medidor de caudal de turbina, el totalizador Invalco ya no será utilizado en el sistema de control, por tal motivo este elemento será retirado. Posteriormente se cubrirá el agujero de la tapa del tablero para finalmente anclarlo a la pared.

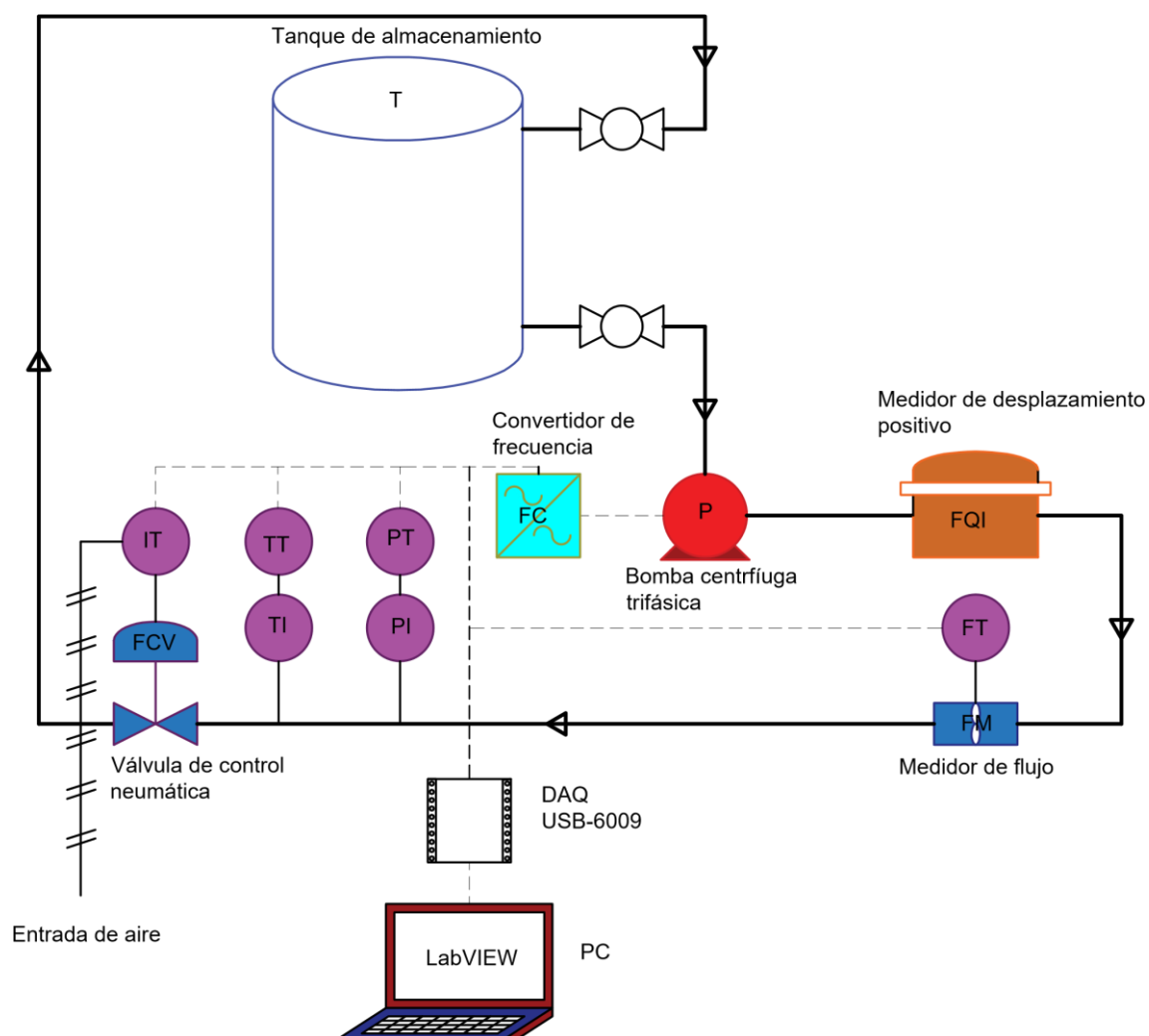
La fuente de energía instalada funciona con normalidad, esto hace que pueda ser utilizada en el nuevo montaje del sistema de control. Los elementos que compondrán el tablero serán distribuidos de manera proporcional, además de que se señalizará todas las partes para una fácil identificación y comprensión.

3.3 Diseño con mejoras propuestas

3.3.1 *Esquema con mejora.* En base al estado previo y las mejoras potenciales propuestas del banco de pruebas para medición y control de caudal, es necesario adquirir algunos elementos que son indispensables para su reacondicionamiento. Todos los elementos que serán añadidos al banco de pruebas serán representados de forma gráfica en un nuevo diseño.

El esquema propuesto se lo realizó en base a las normas ISA, Instrument Society of America, que es la encargada de crear y actualizar de forma permanente normas en instrumentación que se emplean en los procesos. El diseño utiliza específicamente la Norma ISA S5.1 para la representación, simbología e identificación de los elementos presentes en el sistema.

Figura 21. Esquema del sistema con mejora propuesta



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Como se puede observar en el esquema, es necesario adquirir un tanque de almacenamiento plástico para sustituir los dos tanques metálicos. El cambio es inminente ya que los tanques metálicos estaban casi destruidos por causa de oxidación. Se instalará una tarjeta de adquisición de datos, esta permanecerá de forma indefinida en el tablero de control. La DAQ 6009 será la encargada de controlar todo el sistema por medio de LabVIEW.

El medidor de turbina será reemplazado por uno nuevo que no dependa del totalizador. Se necesita de una bomba centrífuga trifásica, reemplazando la bomba original, ya que es monofásica y no es factible conectar su motor al convertidor de frecuencia. El convertidor de frecuencia se añadirá al sistema, destinado a variar la velocidad de rotación del motor de la bomba centrífuga, creando de esta manera perturbaciones al paso del flujo.

CAPÍTULO IV

4. COMPONENTES FÍSICOS Y SOFTWARE PARA EL DESARROLLO

4.1 Instrumentación

Los instrumentos de control se utilizan en todo el mundo debido al desarrollo de nuevas tecnologías, por esta razón se los considera como indispensables para la industria. Estos elementos ayudan a observar y tomar datos de variables que ocurren dentro de algún tipo de proceso, que posteriormente se les da un tipo de tratamiento de acuerdo a las necesidades que se requieran, gracias a esto se mantendrá un correcto funcionamiento y control.

Los elementos de control empleados en las industrias de procesos tales como química, petroquímica, alimenticia, metalurgia, energética, textil, papel, tienen sus propias características de medida y control de los distintos instrumentos utilizados como son: Indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control. (CREUS SOLÉ, 2010)

4.1.1 Indicadores. Están conformados por una escala graduada y un índice en el que se puede observar el valor de la variable medida, estos pueden ser concéntricos o excéntricos dependiendo de la amplitud en su escala. Se pueden encontrar indicadores digitales que muestran las variables medidas con números en forma de dígitos. (CREUS SOLÉ, 2010).

Existen diversos tipos de indicadores, pero para acción de estudio se nombrarán específicamente los presentes en el trabajo de titulación.

4.1.1.1 Termómetro bimetalico. Estos instrumentos están fundidos con distintos tipos de dilatación entre dos metales, como lo son el latón, monel, aleaciones ferro-níquel o invar laminados conjuntamente. Estas láminas se fabrican de forma lineal o curva formando hélices o espirales. Un termómetro de este tipo tiene pocas partes móviles, la aguja se coloca en el extremo libre de la hélice o la espiral del elemento bimetalico (CREUS SOLÉ, 2010).

Figura 22. Termómetro bimetalico



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Tabla 4. Especificaciones técnicas termómetro bimetalico

Especificaciones técnicas termómetro bimetalico	
Rango	10°C a 150°C
Exactitud	±1% al fondo de escala
Diámetro	100 mm
Longitud de vástago sensor	100 mm
Diámetro vástago sensor	6,25 mm
Medidas totales externas	ancho 11cm y largo 13 cm
Conexión	a rosca macho
Temperatura ambiente	máximo +120°C
Máxima temperatura de trabajo recomendable	75% de la escala

Fuente: MARSH

4.1.1.2 Manómetro tipo Bourdon. Es un tubo de sección de forma elíptica que conforma un anillo casi completo, cerrado por uno de los extremos. Al incrementar la presión dentro del tubo tiende a enderezarse y este movimiento se transmite hacia el indicador por medio de un sector dentado y un piñón (CREUS SOLÉ, 2010).

El material que se emplea comúnmente es de acero inoxidable para el tubo Bourdon, aleaciones de cobre además de otras especiales como hastelloy y monel. El elemento en espiral está formado por la arrolladora del tubo Bourdon en forma de espiral en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre por esta razón se utilizan en registradores (CREUS SOLÉ, 2010).

Figura 23. Manómetro Bourdon



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Tabla 5. Especificaciones técnicas manómetro Bourdon

Manómetro Ø100 conexión radial inferior (glicerina)
Características
Tamaño Ø100
Manómetro con conexión radial inferior, rosca macho (BSP) G 1/2" según ISO 228/1.
Caja en acero inoxidable AISI 304
Contiene glicerina
Tubo "Bourdon" y racor en acero inox. AISI 304.
Dial blanco: escala en negro (bar) y roja (psi).
Visor en policarbonato
Tapón de goma para agujero de llenado
Bajo norma EN 837-1.
ASME B40.1-1991 B GRADE
Clase de precisión: cl.1,6
Graduaciones disponibles de 0 a 2,5 - 4 - 6 - 10 -16 - 25 - 40 - 60 - 100 bar.
Temperatura de trabajo desde -15°C a 55°C.

Fuente: GENEBRE

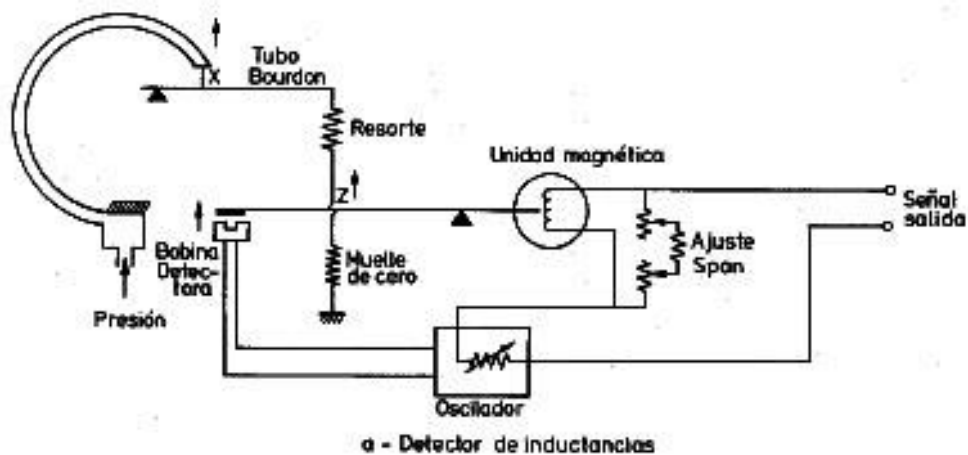
4.1.2 Transmisores. A través de un elemento principal el transmisor es el encargado de captar las variables emitidas al realizarse un proceso y a su vez de transmitir a cierta distancia señales de tipo hidráulica, neumática, digital, electrónica o por radio hacia un instrumento de tipo receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de los mismos (CREUS SOLÉ, 2010).

Se pueden encontrar distintos tipos de dispositivos para la transmisión de señales, como lo son: transmisores neumáticos, digitales, eléctricos, térmicos e hidráulicos. Pero se hablará en particular de los elementos presentes en el trabajo de titulación.

4.1.2.1 Transmisores electrónicos. Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores deferenciales o circuitos de puente Wheatstone o empleando una barra de equilibrio de fuerza, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. su exactitud es del orden de $\pm 0.5\%$ (CREUS SOLÉ, 2010).

La señal es enviada en forma de un impulso eléctrico que es captada por algún tipo de dispositivo electrónico, posteriormente se utiliza estas señales para observar el funcionamiento de la planta por intermedio de algún software instalado en el ordenador.

Figura 24. Transmisores electrónicos



Fuente: Antonio Creus Solé

El transmisor electrónico se alimenta con una fuente de 24 V c.c. y un circuito de dos hilos. El receptor dispone de una resistencia de 250 ohms conectada en los bornes de entrada. De este modo si la señal de salida del transmisor varía entre 4 a 20mA de c.c., se obtendrá las siguientes tensiones en los bornes de entrada al receptor. (CREUS SOLÉ, 2010)

$$250 \text{ ohmios} \times 4 \text{ mA c.c} = 1000 \text{ mV} = 1 \text{ V}$$

$$250 \text{ ohmios} \times 20 \text{ mA c.c} = 5000 \text{ mV} = 5 \text{ V}$$

Este tipo de transmisores por si solos no pueden guardar datos de la planta al igual que los de tipo neumáticos, de tal forma que su implementación ha ido mermando y son poco utilizados en la actualidad.

4.1.2.2 Transmisor de presión de inductancia. Este dispositivo está conformado por dos elementos de ferrita, una dispuesta en la barra y la otra instalada de forma fija al chasis del transmisor, también tiene una bobina que se conecta al circuito del oscilador. Cuando incrementa o disminuye el entrehierro también aumenta o disminuye la inductancia de la bobina, modulando de esta forma la señal a la salida del oscilador (CREUS SOLÉ, 2010).

Figura 25. Transmisor de presión



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de transmisor de presión

Transmisor de presión	
Modelo	2408-10B-511-110-110
Serie Número	80A-23137
Rango	0-100 PISG
Span Lim	25-150 PSI
Max W.P	150 PSI
Diaphragm	S.S
Flange	C.S
Supply	24 V D.C
Intensidad	4-20 mA
ISA	SP50.1-2L

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

4.1.2.3 Transmisor de temperatura. Son elementos diseñados para acondicionar y linealizar una señal, con este tipo de transmisores se logra que las señales adquiridas de PTC, RDT y termopares se puedan llevar a gran distancia, cosa que los sensores de forma independiente no pueden hacerlo, de esta manera se garantiza que el usuario obtenga una señal estable y fiable dentro de algún proceso que lo requiera.

Un transmisor de temperatura tiene como salida 4 hasta 20 miliamperios, medio más común en transmisores, por ejemplo esta intensidad representa unidades de temperatura de 0°C hasta 100°C. Además que cumple con varias funciones como asilar, amplificar, filtrar el sonido, linealizar y convertir la señal que ingresa en una estándar para el control.

Figura 26. Transmisor de temperatura



Fuente : Tierra D. & Zamora M.

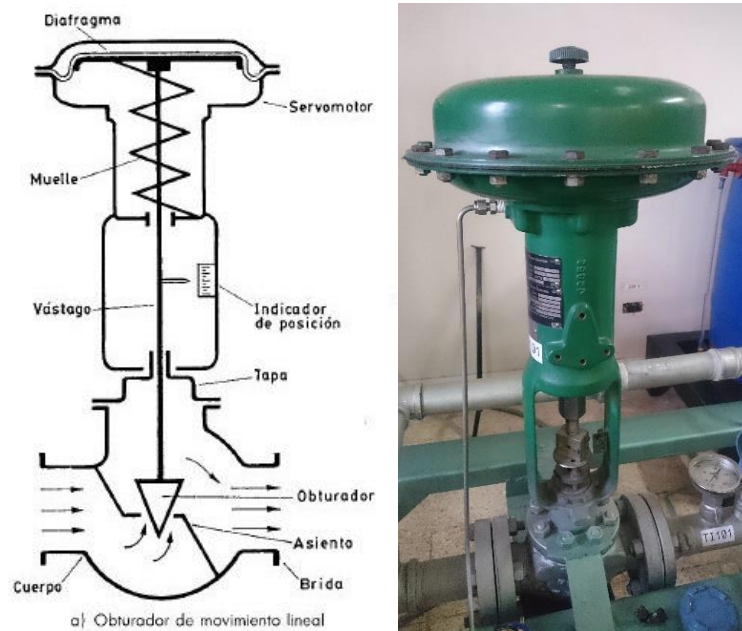
Tabla 7. Especificaciones técnicas de transmisor de temperatura

Transmisor de temperatura	
Modelo	244EHE5J6
Tipos de sensor	PT100_385
Rango	0 a 100 DEG C
Temp. Ambiente	-50 a 80 °C
Equipo	
Serie	100769
Alimentación	24 DC
Máxima intensidad	23 mA
Fecha	02/11/2002

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

4.1.3 Válvulas de control.

Figura 27. Válvula de control neumática



Fuente: Antonio Creus Solé

Tabla 8. Especificaciones técnicas válvula neumática

Especificaciones Técnicas	
Actuador	
Serial N°	12932018
Size	34
Travel	3/4
Tipe	667
Bench Set	7_16
Oper range	3_15
Press Units	PSI
Cuerpo	
Serial N°	12932018
Size	1 1/2
Rating	C.I. 300/740 Psi CWP
Plug	S.S.T.
Body	S.T.L.
Type	8T
Port size	1 7/8
Stem	S.S.T.
Seat	COMP

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Son importantes dentro del bucle de regulación en procesos industriales, realiza la función principal de variar el caudal del fluido de control que modifica, a su vez, el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene importancia tanto el elemento primario como, el transmisor y el controlador (CREUS SOLÉ, 2010).

La válvula de control neumático consiste en un mecanismo accionado por la señal neumática de 3 a 15 psi. El mecanismo está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido de manera proporcional. El caudal suministrado está dado por la carrera en función de las curvas características de la válvula. (CREUS SOLÉ, 2010)

El cuerpo de la válvula de control contiene en su interior el obturador y los asientos, y está provista de roscas o de bridas para conectarla a la tubería. El obturador quien controla el paso de flujo puede actuar en dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Esta unido a un vástago que atraviesa la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor. (CREUS SOLÉ, 2010)

Las válvulas se pueden clasificar en varios tipos y depende del tipo de obturador con el que esté compuesta.

- Válvulas con obturador de movimiento lineal: Angulo, globo, tres vías, compuerta, jaula, manguito, cuerpo partido, Saunders.
- Válvulas con obturador de movimiento rotativo: de bola, obturador cilíndrico excéntrico, orificio ajustable, mariposa, flujo axial, disco excéntrico.

4.1.4 Transductor. Transductor es un dispositivo que se encarga de transformar una señal de una forma física a una señal requerida pero de otra forma física diferente. Básicamente transforma un tipo de energía en otro. Esto da como resultado que la señal de entrada sea energía o potencia, pero al ser medida una de sus componentes al ser tan pequeña esta pueda desperdiciarse, e interpretar que solo se está midiendo la otra componente (PALLÁS ARENY, 2003).

4.1.4.1 Transductor electroneumático. El principio de funcionamiento se basa en el balance de fuerzas, en el que se suspende una bobina en un campo magnético producido por un imán permanente. La corriente que atraviesa la bobina genera un movimiento de forma axial y al mismo tiempo su flexionamiento. Esta flexión mueve la lámina metálica hacia la abertura de una boquilla, creando una contrapresión en la boquilla y restringiendo el paso del aire a través de esta.

La compresión que se crea, actúa como si fuera un relé, entonces a medida que la señal de corriente a la entrada aumenta, la salida de presión aumenta en proporción y de igual forma se disminuye. El transmisor tiene dos tornillos de regulación como lo es el cero y span, el cero sirve para hacer girar la boquilla en relación a la flexión de la lámina, el span limita la corriente que se introduce a la bobina.

Figura 28. Transmisor electroneumático



Fuente: FAIRCHILD

Tabla 9. Características técnicas transmisor neumático

Trasmisor Neumático	
Modelo	TFXPD 6000_41
Input	4 a 20 mA
Ouput	3 a 15 PSIG
Supply	20 a 120 PSIG

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

4.1.5 Totalizador. Los contadores o totalizadores se utilizan comúnmente para observar una variable dentro de un proceso, esta variable va acumulándose numéricamente en forma de indicador. La forma de accionamiento del totalizador es de forma mecánica, mediante el accionamiento de números giratorios impresos a través de un sistema de engranajes.

Figura 29. Totalizador mecánico de flujo



Fuente : Smith

Tabla 10. Especificaciones técnicas de totalizador mecánico

Máximo caudal		
	USGPM	L/min
Calificación continua	80	300
Clasificación intermitente	100	375
Ajuste	75	285
Viscosidad		
Estándar	400 mPa.s3 (200 SSU) máximo	
Opcional	2 Pa.s (10 000 SSU) máximo	
Sobre	Viscosidad por encima de 2 Pa.s	
Temperatura		
Estándar	-29°C a 65°F	
Opcional	-29°C a 93°F	
Máxima presión		
Estándar	150 PSI sobre 93°F	

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

4.1.6 Medidor de caudal de turbina. Este medidor está compuesto por un cuerpo plástico de alta resistencia, un rotor que se mueve por acción del agua circulante, y principalmente un sensor de efecto hall colocado en la parte superior.

Al atravesar el fluido por los álabes estos giraran de forma proporcional al paso o cantidad de fluido que circula, a su vez el sensor de efecto Hall obtiene esa señal y la trasmite en forma de pulsos hacia un contador, este medidor de turbina tiene un rango de exactitud del $\pm 3\%$ de error.

Figura 30. Caudalímetro



Fuente: Seeed Studios

Tabla 11. Características técnicas de flujómetro

Características técnicas caudalímetro de paletas	
Voltaje de trabajo mínimo	4.5V
Máxima corriente de trabajo	15 mA
Voltaje de funcionamiento	5 a 24 V DC
Rango de flujo	10 a 200 l/min
Capacidad de carga	máx. 10mA
Temperatura de funcionamiento	máx. 80°C
Temperatura del liquido	máx. 120°C
Humedad	35% a 90% RH
Presión de agua	máx. 2Mpa
Diámetro	2"
Ciclo de pulsos	50 a 10%
Fórmula de cálculo	Q= 12pulsos por Litro
Almacenamiento	Temp. Ambiente

Fuente: Seeed Studios

4.2 Bomba centrífuga.

Funcionan por medio de energía cinética agregada al fluido cuando acelera la rotación de un impulsor. El fluido pasa por el centro del impulsor y luego es desplazado hacia afuera por medio de las aspas. Al abandonar el impulsor el líquido circula por una voluta que tiene forma de espira, en donde desciende de forma gradual y produce que la energía cinética se transforme en presión para el fluido (MOTT, 2006).

El tipo de bomba seleccionada abastece del caudal necesario para el banco de pruebas, además de tener conexión trifásica necesaria para la aplicación propuesta.

Figura 31. Bomba centrífuga 1HP WEG



Fuente: WEG

Tabla 12. Características técnicas bomba centrífuga

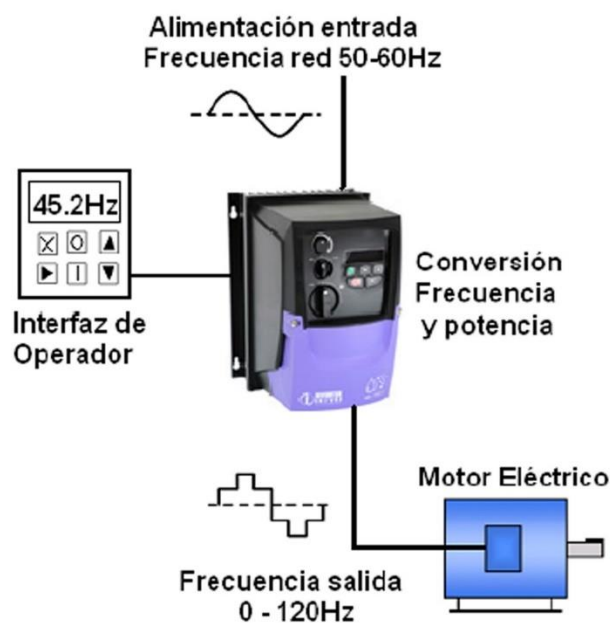
Bomba centrífuga 1HP WEG	
Tipo	Superficie
Conexión	Trifásica
Flujo óptimo	150 LPM
Altura óptima	24m
Diámetro de succión	1,25 pulg
Diámetro de descarga	1 pulg
Tipo de impulsor	Cerrado
Material de cuerpo	Hierro fundido
Material de impulsor	Nylon/ Noryl
Material sello mecánico	Cerámica/carbón/acero inoxidable/Buna
Temperatura de agua máx.	40°C

Fuente: WEG

4.3 Convertidor de frecuencia

Los convertidores de frecuencia son aparatos que modifican o alteran la frecuencia, por esta razón es que se produce un cambio en la velocidad de un motor, esto se produce generando corriente alterna con una frecuencia necesaria para accionarlo. Los convertidores o variadores de frecuencia como se los conoce comúnmente permiten modificar el valor de la frecuencia y por ende cambiar la velocidad del motor a mayor o menor velocidad.

Figura 32. Convertidor de frecuencia electrónico



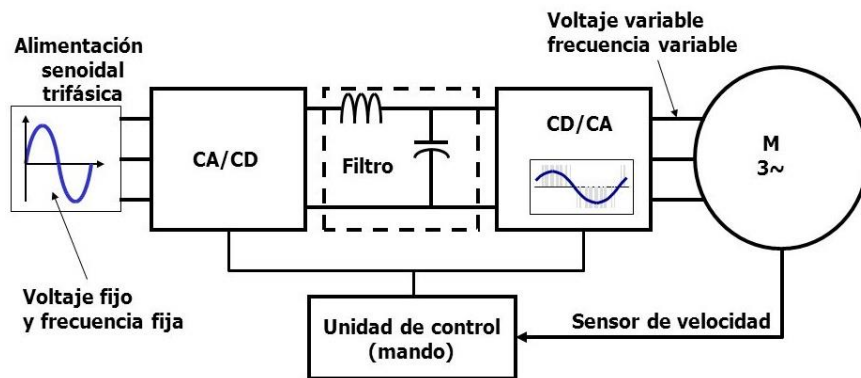
Fuente: El blog del instalador

4.3.1 Principio de funcionamiento de un convertidor de frecuencia. La red suministra corriente alterna con una frecuencia y voltaje determinados dependiendo de las necesidades del usuario. Entonces para realizar este proceso lo primero que hace el variador de frecuencia es tomar energía de la red para transformarla en corriente continua por medio de rectificadores y filtros, posteriormente se vuelve a transformar esta energía en voltaje alterno con características de magnitud y frecuencia variables realizados por medio de inversores.

Se puede obtener una fuente de alimentación trifásica a través de una red monofásica o bifásica. Las señales de las ondas que se generan al realizar este proceso no es una

sinusoide perfecta, ya que lo que se obtiene son pulsos modulados a partir de la frecuencia conmutada. Pero se pueden encontrar equipos que pueden generar frecuencias conmutadas de hasta 50 kHz, para esto se utilizan filtros que logran mantener el valor requerido y que cumple con normas dispuestas por varios países.

Figura 33. Funcionamiento de un convertidor de frecuencia



Fuente: WEG

4.3.2 Funciones que realiza el sistema de control

- Realizar la variación de la frecuencia
- Regula la tensión o corriente
- Conmutación de la corriente en los devanados del motor
- Protege el convertidor, de tal manera que limita la intensidad a un valor permitido por semiconductores del convertidor.
- Protege los devanados del motor al limitarle la intensidad que circule en función de la admisible por el motor.
- Se puede obtener una fuente trifásica desde una monofásica
- Se puede obtener una fuente trifásica desde una bifásica
- Reduce el consumo de energía al utilizar solo lo que requiere el sistema.

4.3.3 Convertidor de frecuencia CFW500 WEG. Es un accionador de velocidad variable de alta precisión especialmente en aplicaciones donde se necesita el control de velocidad en motores de inducción trifásicos. El control es vectorial, SoftPLC, que integra funciones de CLP, Pump Genius, para accionamiento multibombas y módulos plug-in seleccionables, que proporcionan varias soluciones muy flexibles (WEG, 2014).

Figura 34. Convertidor de frecuencia CFW500



Fuente: WEG

Tabla 13. Características técnicas variador de frecuencia

Características técnicas CFW500 WEG	
Corriente de salida 1,0 a 56,0 A (0,25 a 30,0 cv / 0,18 a 22,0 kW)	IGBT de frenado (disponible en los tamaños B y C)
Tensión de alimentación monofásica o trifásica 200-240 V, 380-480 V o 500-600 V	Protección clase 3C2 o 3C3 para aplicaciones en ambientes con agentes químicos corrosivos
Escalar (V/F), Vectorial VVW, Vectorial Sensorless y Vectorial con Encoder	Grado de protección IP20 (estándar) y NEMA1 (opcional)
Módulos plug-in seleccionable	Ventilador con sistema de cambio rápido
Filosofía plug & play	Filtro RFI interno (opcional)
Interfaz de operación y programación (IHM) incorporada	Diagnósticos de alarmas o fallas
Puerto RS485 incorporada (en cualquier módulo plug-in seleccionado)	Comunicación Fieldbus (conforme módulo plug-in seleccionado) CANopen, DeviceNet, Profibus-DP o Ethernet
Pump Genius - Multipump	Puerto de comunicación USB (accesorio CFW500-CUSB)
SoftPLC - funcionalidades de CLP incorporadas	Tarjeta de memoria para transferencia de datos (parámetros y SoftPLC) sin necesidad de energizar el CFW500 (accesorio CFW500-MMF)
Instalación lado a lado (para temperaturas por debajo de 40 °C)	Software de programación gratuitos WLP y SuperDrive G2
Temperatura ambiente de operación 50 °C	Interfaz de operación (IHM) remota serial (accesorio CFW500-HMIR)

Fuente: WEG

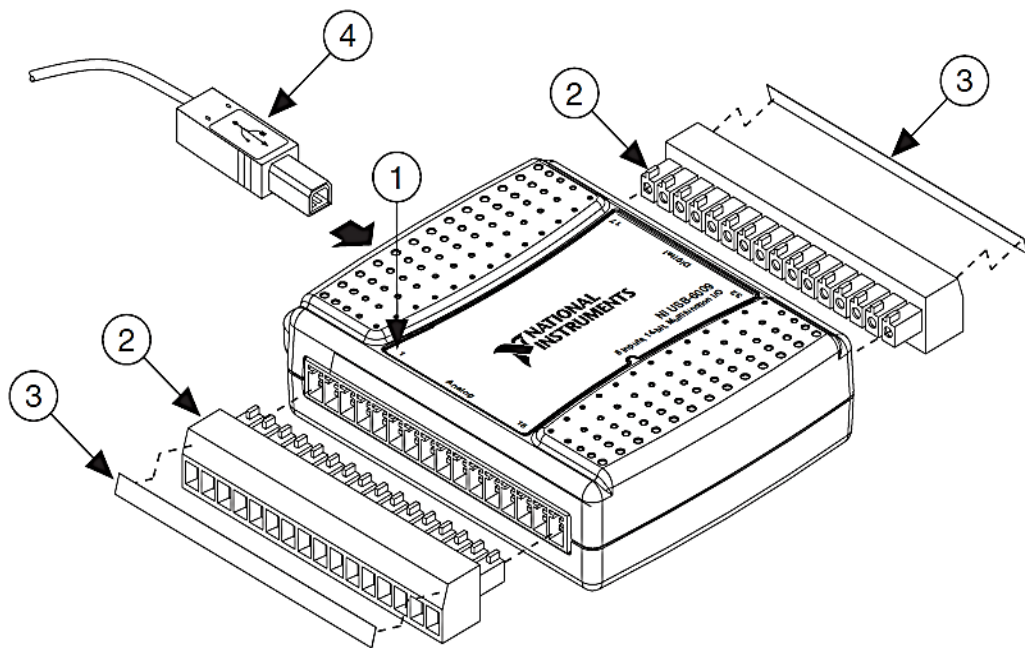
4.4 Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6009

La tarjeta de adquisición de datos NI/USB 6008/6009 provee al usuario un dispositivo compacto de fácil manejo, portable utilizado para un sinnúmero de aplicaciones dentro de los campos de control y automatización, generalmente utilizado por estudiantes para prácticas. Este dispositivo cuenta con una conexión de 8 canales de entradas analógicas (AI), 2 salidas (OI), 12 canales para salidas y entradas digitales y 1 contador de 32 bits interface full-speed USB (NATIONAL-INSTRUMENTS, 2014).

Las partes principales son:

- Cubierta etiquetada con guías marcadas con los números de los terminales
- Bloque de terminales atornillado
- Etiquetado de terminales
- Cable de datos USB

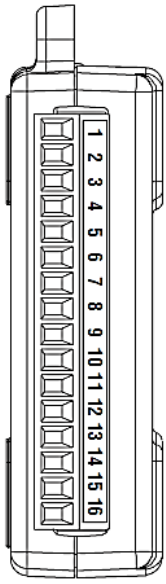
Figura 35. NI USB-6008/6009

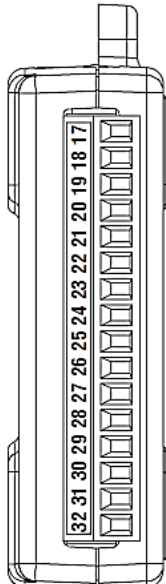


Fuente : National Instruments

4.4.1 Conectores. NI USB-6008/6009 cuenta con dos bloques desmontables el uno para señales analógicas y el segundo para señales digitales.

Tabla 14. Bloque de tablas analógicos y digitales

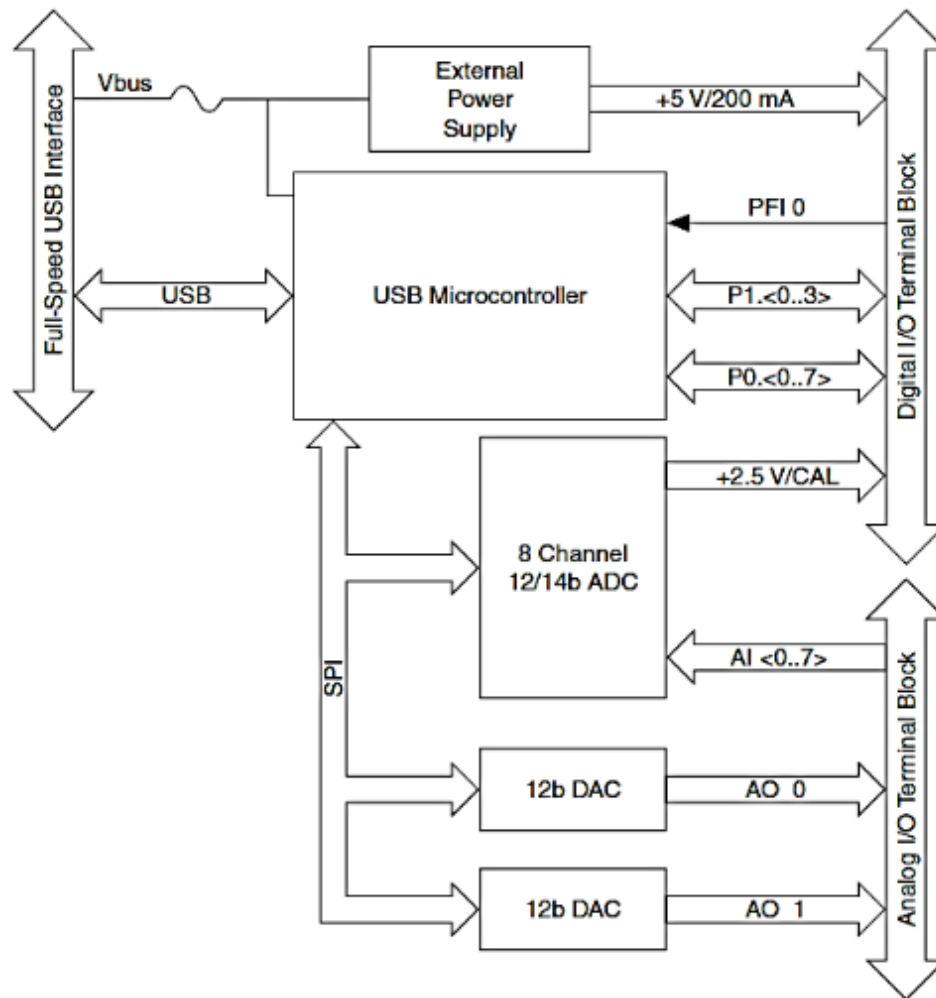
Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0–
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1–
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2–
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3–
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Module	Terminal	Signal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PFI 0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

Fuente: National Instruments

4.4.2 Hardware.

Figura 36. Diagrama de bloques de componentes de NI USB-6008-6009



Fuente : National Instruments

4.4.3 Aplicaciones generales

- Crear mediciones de entradas analógicas
- Generar niveles de voltaje de salida
- Registrador de datos simples y conteo de eventos
- Control en lazo cerrado
- Experimentos académicos de laboratorio

4.4.4 Adquisición de datos. Conjuntamente con la generación de señales eléctricas, mediante una tarjeta de adquisición de datos, esto se ha convertido en el uso más impórtate que LabVIEW brinda a sus usuarios.

Figura 37. Partes de un sistema DAQ



Fuente: National Instruments

La tarjetas de adquisición de datos (DAQ) no pueden realizar operaciones de forma independiente por estos es necesario que se encuentre conectado a un computador para que lo gobierne. Según (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011) las capacidades comunes que suelen tener las DAQ son:

- Adquisición de señales analógicas.
- Generación de señales analógicas.
- Generación y adquisición de señales digitales.
- Controladores y timers.
- Triggers
- Autocalibración, sensores, etc.

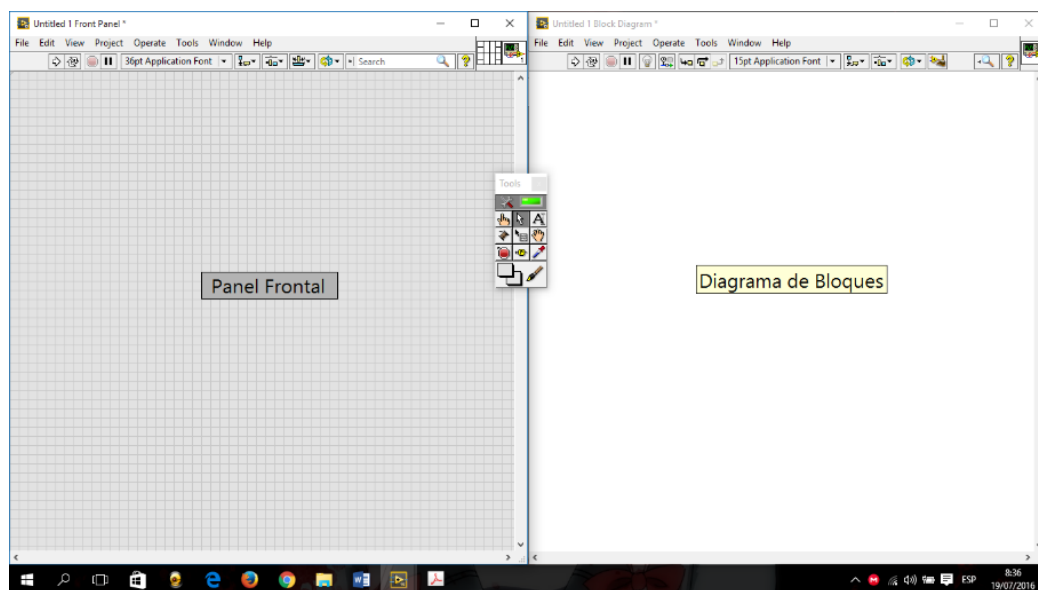
4.5 LabVIEW

LabVIEW son siglas en ingles que significa *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*. Es un entorno de desarrollo y una plataforma que sirve para diseñar varios sistemas por medio de un lenguaje de programación tipo gráfico, que permite al usuario crear aplicaciones de manera más rápida y sencilla.

4.5.1 Entorno. LabVIEW al ser una herramienta que permite programar de forma gráfica. Facilita al usuario crear programas utilizando herramientas de instrumentación virtual, por este motivo las extensiones que se utilizan en los trabajos realizados se los conoce como VI (Virtual Instruments).

El interface de LabVIEW cuenta con dos ventanas principales como lo es el Panel Frontal y el Diagrama de bloques.

Figura 38. Entorno general LabVIEW



Fuente: LabVIEW

Tanto el Panel Frontal como el Diagrama de bloques están interconectados entre sí a través de terminales, que permiten la salida e ingreso de datos. Dicho de otra manera, si en el panel frontal insertamos un *boolean* o booleano este aparecerá en el diagrama de bloques en forma de icono.

Además cuenta con grupos de herramientas como son de ejecución, depuración, sistemas

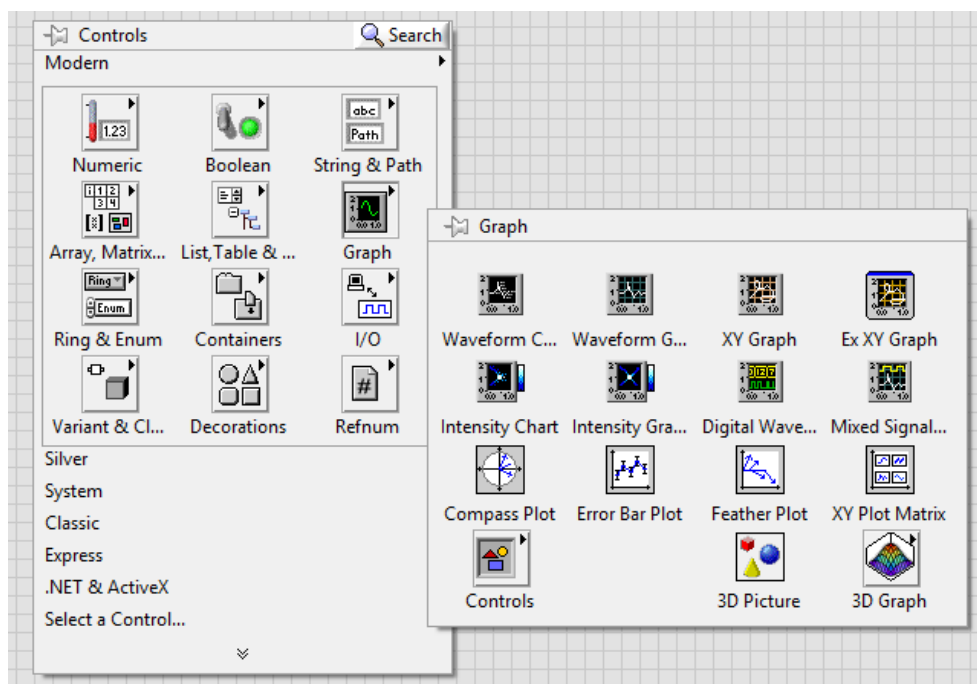
de textos y movimiento, que brindan al usuario tener accesibilidad rápida a los mismos. Sin olvidar que existe un botón de ayuda que indica a breves rasgos el entorno de que está compuesto LabVIEW.

4.5.2 Controles. El menú de controles pertenece exclusivamente al Panel Frontal, en el cual se pueden visualizar varios terminales que se usan para la interacción con la persona.

Los terminales de este menú genéricamente se los conocen simplemente como controles, pero en realidad se dividen en controles e indicadores. Los controles son quienes reciben las entadas de datos y los indicadores son lo contrario es decir la salida de datos.

El menú de controles cuenta con una amplia lista submenús desplegables y clasificados de acuerdo por el tipo de datos que maneja, mismos que están provistos de varias herramientas que utiliza el usuario para diseñar su programa.

Figura 39. Representación general de controles



Fuente: LabVIEW

Al utilizar un elemento del menú y colocarlo en el Panel Frontal, aparecerá un gráfico por defecto en su representación y con su respectivo cuadro de texto. Dicha representación es dinámica ya que se puede variar en todos los aspectos posibles como

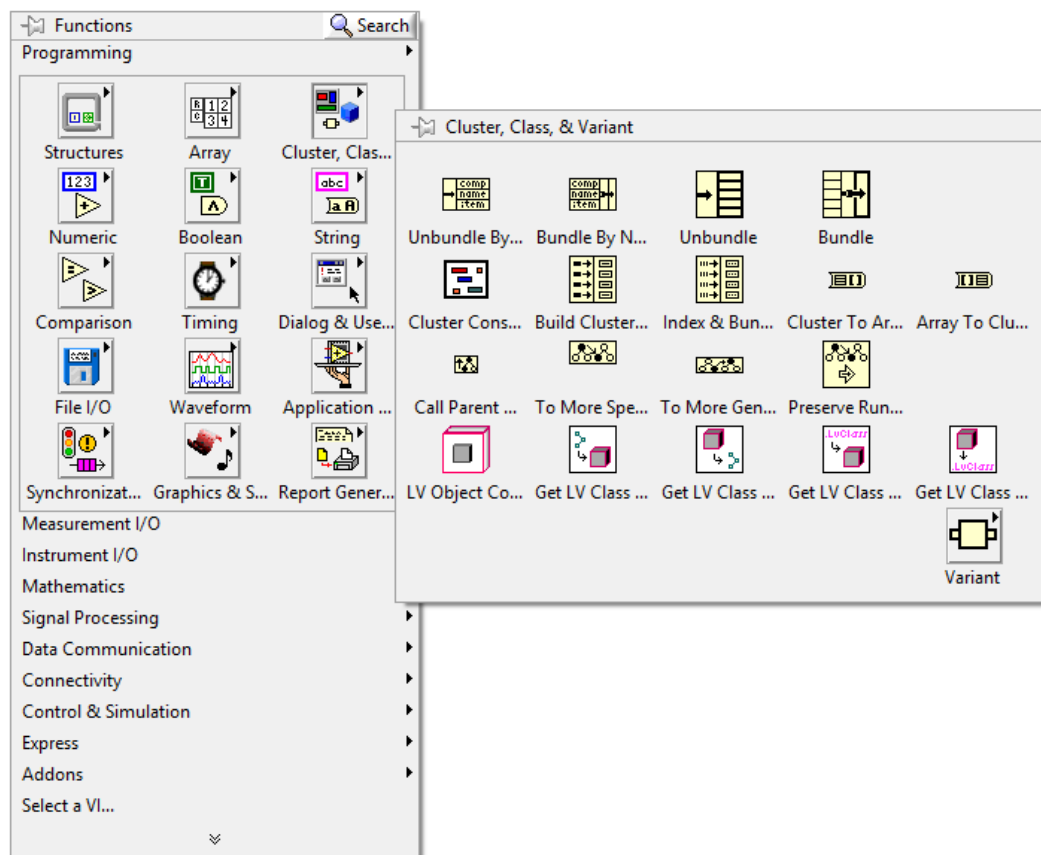
puede ser su color, el tamaño, texto, etc.

Los controles o indicadores pueden mostrar distintos gráficos en diferentes momentos, según (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011) cuando se coloca un control personalizado en un Panel Frontal no existe ningún vínculo entre el fichero donde el control está definido y sus instancias empleadas en cada VI donde es usado, se trata de copias independientes. Si una instancia se modifica no afecta al resto.

4.5.3 Funciones. Esta paleta pertenece exclusivamente al Diagrama de bloques, la cual cuenta con varias funciones, subVI y estructuras.

De igual manera al Panel Frontal de esta paleta de funciones esta provista de varios submenús desplegables. Estos menús están divididos de acuerdo a las distintas funciones que realizan. Los más utilizados son los submenús de programación y que salen por defecto al abrir la paleta de funciones.

Figura 40. Menú o paleta de funciones



Fuente: LabVIEW

El contenido es muy variado en cuanto a menús de programación, como es el caso de *Structures* que contiene elementos con equivalencia a las instrucciones de elementos de control de lenguajes convencionales. *Array* que ayuda al usuario a realizar arreglos conformados de distintos datos compuestos. También se observa *Cluster*, *Class* & *Variant* que son un conjunto desordenado u otros tipos de datos y tienen equivalencia a los *Structure* del lenguaje C.

Numeric son datos numéricos que se componen de enteros y decimales, además de varias herramientas para la ejecución de cálculos matemáticos. Los booleanos no son nada más que botones que representan valores de dos tipos: Verdadero (true) y Falso (false) (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011).

4.5.4 Creación de programas. En LabVIEW se realiza la programación en el Diagrama de Bloques, según (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011) un programa habitualmente está conformado por:

- Controles: sirven de entrada para los datos.
- Funciones, Vis y estructuras; realizan una o varias operaciones con estos datos.
- Indicadores: sirven de salida para los datos.

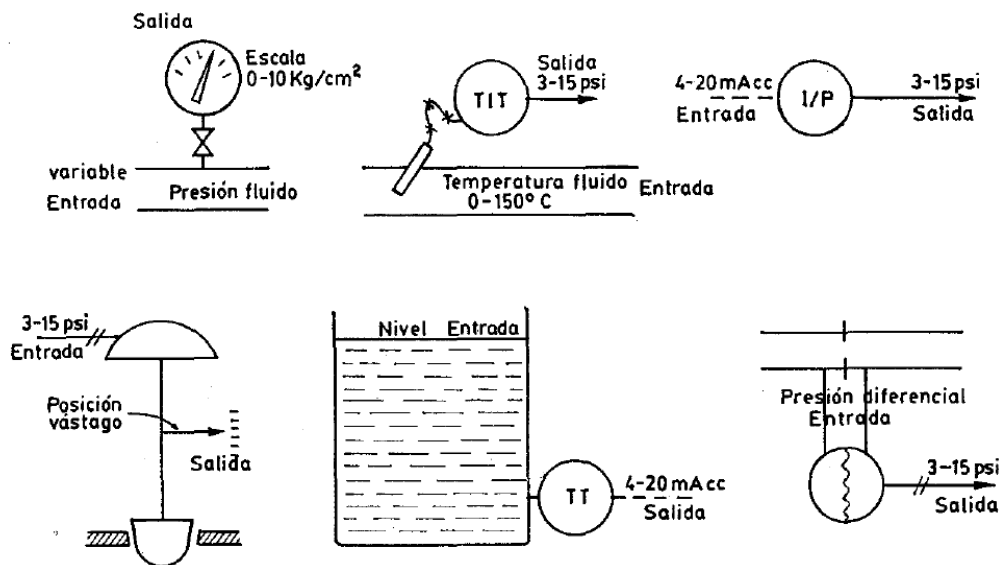
4.5.5 Flujo de ejecución. LabVIEW utiliza el famoso lenguaje G que no es más que programar de forma gráfica utilizando diagrama de bloques. Gran variedad de programas se realizan en base a una programación imperativa es decir que utilizan una sucesión de operaciones por medio de texto alfanumérico, sin embargo LabVIEW usa una ejecución que se basa en el flujo de datos (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011).

Un programa desarrollado en LabVIEW consiste en realizar una serie de funciones que se encuentran unidas por cables y los datos que se generen circularán a través de estos. Para que se cumpla una función esta deberá disponer de todos los datos en sus entradas necesarios para ejecutarse, de esta forma se pueden realizar varias funciones de forma paralela, que es lo más apropiado para aprovechar al máximo el rendimiento de sistemas que tengan multiprocesador y multihilo (LAJARA VIZCAÏNO, y otros, 2011).

4.6 Calibración de instrumentos

Los instrumentos son muy importantes dentro de la industria, están diseñados para realizar distintas funciones como medir, transmitir y también controlar variables al interior de un proceso. Al conocer como funcionan los instrumentos en la industria, es necesario tomar en cuenta la relación que existe entre variables, tanto de entrada como salida del instrumento.

Figura 41. Relación de salida y entrada en instrumentos



Fuente: Creus Solé

Al instalar un instrumento nuevo en una fábrica y dejarlo olvidado, este se ira descalabrando con el tiempo dependiendo de las condiciones del proceso al que este expuesto. Existen varias causas, como la vibración, golpes, temperatura, cambios dentro del proceso que puedan variar los límites para el que fue diseñado. Por eso es muy importante implementar intervalos de calibración para que los instrumentos mantengan en buenas condiciones y tenga una buena fiabilidad en sus lecturas.

Cada instrumento está asociado a una incertidumbre propia de su estado. Para calibrar un instrumento es necesario tener un patrón para calibración o comúnmente conocido como patrón de referencia. Este patrón debe tener un intervalo de medida lo más cercano posible al valor a medir, a su vez el patrón está asociado a una incertidumbre producido por su propia fabricación (CREUS SOLÉ, 2009).

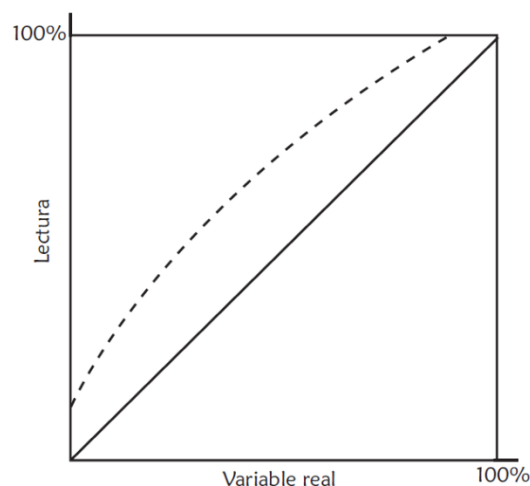
Según (CREUS SOLÉ, 2009) la calibración puede realizarse de dos maneras:

La primera forma se la considera como más exacta al realizar las mediciones con el patrón en forma repetitiva. Este número de veces asegura que el nivel de confianza del instrumento sea bastante elevado y se lo puede hacer entre 10 y 20 veces. Este método se aplica en laboratorios acreditados y de forma opcional en los procesos industriales. Esto será necesario siempre y cuando la necesidad lo amerite (CREUS SOLÉ, 2009) .

La segunda forma se simplifica, al realizar un método de calibración más sencilla y la confirmación con mediciones en puntos específicos de la escala, comúnmente 0%, 25%, 75% y 100%. Proceso más utilizado en la industria. (CREUS SOLÉ, 2009)

4.6.1 *Tipos de errores.* Si un instrumento fuera ideal, la relación de valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida y los valores de lectura del aparato debe ser lineal. Un instrumento bien calibrado se refiere a que todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado o registrado o transmitido, está comprendido entre los límites determinados por la exactitud del instrumento. (CREUS SOLÉ, 2009)

Figura 42. Curva variable real-lectura



Fuente: Creus Solé

Según (CREUS SOLÉ, 2009), en condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico con relación a la recta real representan los errores de medida.

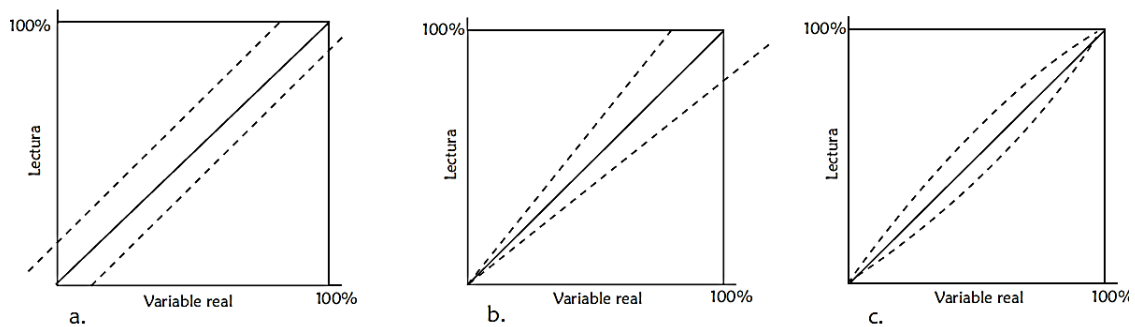
Esta curva puede descomponerse en tres tipos:

4.6.1.1 Error cero. Todas las lecturas o señales de salida están desplazadas un mismo valor con relación a la recta ideal. El desplazamiento puede ser positivo o negativo. Cambia el punto de partida o de base de la recta representativa sin que la inclinación de forma a la curva.

4.6.1.2 Error de multiplicación. Todas las lecturas o señales de salida aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, sin que el punto de partida cambie. La desviación puede ser positiva o negativa.

4.6.1.3 Error de angularidad. La curva coincide con los puntos 0 y 100%, de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. El máximo de la desviación suele estar en la mitad de la escala.

Figura 43. Errores, cero, multiplicación y angularidad



Fuente: Fuente: Creus Solé

Estos errores se pueden corregir al ajustar los instrumentos, además hay que tener en cuenta que algunos instrumentos por su forma de construcción carecen del error de angularidad. Otros errores se producen por efecto del observador como son el error de paralaje y error de interpolación. Estos últimos no existen en instrumentos con salidas digitales.

CAPÍTULO V

5. INSTALACIONES GENERALES Y PROGRAMACIÓN

Los capítulos expuestos anteriormente son fundamentales en este punto, ya que en estos se encuentran a detalle todo lo relacionado al banco de pruebas para medición de flujo y control. Esto hace que se complemente todo lo teórico con la parte práctica, esencial para poder comprender como funcionan cada una de las partes y la forma de como deben ser instalados.

Cada elemento cumple una función específica dentro del proceso. Dicha función debe ser ejecutada de la forma más precisa, para que los datos arrojados en el proceso sean los más confiables posibles. Por tal motivo deben ser instalados en el módulo de manera adecuada bajo condiciones específicas, es decir que se deben tomar en cuenta sus características técnicas.

Al completar las instalaciones y reparaciones necesarias se procederá a la creación del programa en LabVIEW, software que provee la National Instruments. Este software es de fácil instalación al igual que sus controladores, necesario para poder conectar la tarjeta de adquisición de datos al PC. La programación se realiza en lenguaje G, es decir se lo hace de forma gráfica.

Finalmente se tiene previsto realizar las pruebas de funcionamiento pertinentes, cada una de las partes será verificada y comprobada para evitar a posterior cualquier tipo de error en el sistema. Se tomarán datos en tiempo real para irlos comparando y relacionando, así se podrá corregir posibles inconsistencias.

5.1 Instalación y recambio de elementos

A continuación se describe el proceso de instalación de varios elementos que fueron reparados y adquiridos. El cambio de algunos elementos obsoletos por nuevos es inminente, ya que se encontraban deteriorados, dañados o no servían para la aplicación requeridas. Adicionalmente se adquieren nuevos elementos para ser añadidos al sistema, cabe recalcar que no son sustituciones.

5.1.1 *Cambio de tanques de almacenamiento.*

El deposito nuevo cuenta con las siguientes características:

- Línea de 2 pulgadas de ingreso
- Línea salida de dos pulgadas
- El tanque si tiene que instalar por encima del nivel de la bomba (succión positiva)
- Visor de nivel a un costado del tanque
- Tapa para sellar el tanque
- Válvula de drenaje

La sustitución de los dos tanques metálicos para el almacenamiento del líquido se lo hizo por un tanque de plástico. Este tanque tiene la capacidad de almacenar hasta 200 litros de agua, cantidad necesaria para abastecer de líquido a todo el sistema, además reduce el deterioro del agua almacenada al no producirse corrosión.

Figura 44. Cambio de tanques de almacenamiento



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Al ser retirados los tanques obsoletos, se observó que la base que los mantenía elevados era demasiado grande para el nuevo tanque, por tal motivo se procedió a hacer la reducción a la tercera parte del tamaño original.

Como se puede observar, el resultado es muy satisfactorio, ya que gran parte del espacio físico ocupado por el modelo anterior fue liberado. Esto beneficia en gran medida al usuario, ya que puede tener acceso directo a todas las partes que conforma el módulo de pruebas, facilitando el manejo y mantenimiento.

5.1.2 *Cambio de bomba centrífuga.* Se procede a retirar el equipo antiguo utilizando herramientas manuales. El equipo desmontado está en buenas condiciones, pero como se dijo en el capítulo anterior, no cumple con las necesidades propuestas para las aplicaciones requeridas.

Figura 45. Cambio de bomba centrífuga



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

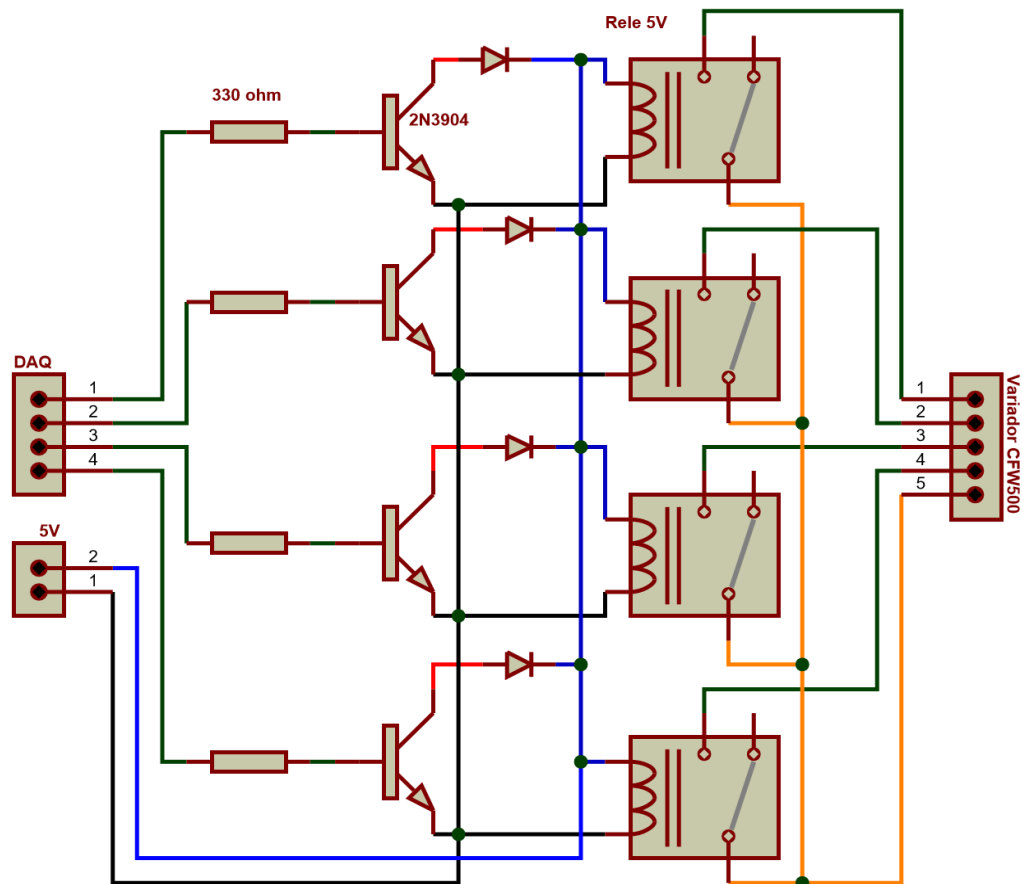
La causa principal del intercambio de bomba es el tipo de alimentación. La primera imagen muestra una bomba centrífuga con condensador de marcha de alimentación monofásica, mientras que la segunda imagen hace referencia a una bomba centrífuga para alimentación trifásica, la misma que es necesaria para poder conectarla a un variador de frecuencia.

La bomba no se monta directamente en el suelo sino que se ancla a una superficie metálica mediante pernos. Este montaje se lo hace para no dañar la superficie del laboratorio, además de que todo el módulo tenga la posibilidad de cambiar de posición sin necesidad de desmontar ningún equipo.

5.1.3 Instalación de convertidor de frecuencia. La mejora consiste en poder crear perturbaciones o variaciones de caudal en el sistema, pero utilizando el computador como medio. Para esto lo más factible es hacerlo mediante variaciones de velocidad del motor eléctrico de la bomba centrífuga utilizando un convertidor de frecuencia.

El convertidor de frecuencia es capaz de realizar variaciones de velocidad en un motor eléctrico por medio de la frecuencia suministrada. La frecuencia se la puede variar entre 1 y 60 Hz, permitiendo controlar las revoluciones de la bomba y por ende la cantidad de caudal que atraviesa por el sistema.

Figura 46. Circuito de mando para variador CFW500

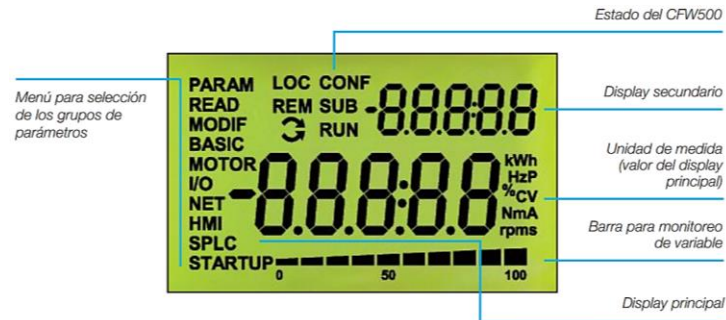


Fuente: Tierra D. & Zamora M.

El circuito presentado es el encargado de accionar el variador de frecuencia. La tarjeta de adquisición de datos mediante sus salidas digitales activan los relés, cada relé conecta la salida digital del variador de frecuencia con el común del mismo, el variador reconoce el contacto y emite la frecuencia programada previamente en las funciones del convertidor de frecuencia.

Con la ayuda del manual de usuario del convertidor de frecuencia CFW500 se procede a modificar los parámetros necesarios para que el variador ejecute las órdenes enviadas desde la tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009 por medio de la placa de relés.

Figura 47. Interface de operación CFW500



Fuente: WEG

Para empezar a modificar parámetros en el convertidor de frecuencia es necesario conocer algunas características básicas, principalmente como esta compuesto el interface de operación como se observa en la figura anterior.

Para este caso, se selecciona del menú el grupo “PARAM” donde se tiene acceso a todos los parámetros. A continuación se describen los parámetros modificados para esta aplicación.

Tabla 15. Parámetros modificados de variador CFW500

Parámetro	Descripción	Valor Fijado
P0007	Tensión de salida	220 V
P0027	Conf. Modo Plug In	1=CFW500-IOS
P0029	Conf. HW Potencia	3= 200-240V /4,3Am
P0100	Tiempo de aceleración	3 Segundos
P0101	Tiempo de desaceleración	3 Segundos
P0124	Referencia 1 Multispeed	11.1 Hz
P0125	Referencia 2 Multispeed	17 Hz
P0126	Referencia 3 Multispeed	24Hz
P0127	Referencia 4 Multispeed	31 Hz
P0128	Referencia 5 Multispeed	38 Hz
P0129	Referencia 6 Multispeed	45 Hz
P0130	Referencia 7 Multispeed	52 Hz
P0263	Función de la entrada DI1	1= Gira/Para
P0264	Función de la entrada DI2	13=Multispeed
P0265	Función de la entrada DI3	13=Multispeed
P0266	Función de la entrada DI4	13=Multispeed

Fuente: WEG

5.1.4 *Instalación de medidor de turbina.* Este instrumento de medición de caudal es capaz de medir hasta 200 litros por minuto, su cuerpo es de material plástico robusto con rosca externa en cada extremo. No necesita de un acondicionador de señal para ser conectado a la tarjeta de adquisición de datos, ya que emite pulsos de bajo voltaje y corriente de baja intensidad.

Por motivo de que el medidor de caudal original estaba colocado mediante acoples de palanca, fue necesario mecanizar dos piezas metálicas para instalar el nuevo instrumento. Cada una de las piezas está diseñada de tal forma que uno de sus extremos tenga una parte con rosca interna, necesario para roscar el medidor y el otro extremo cuente con una ranura guía para unión por acople de palanca.

Figura 48. Cambio de medidor de turbina

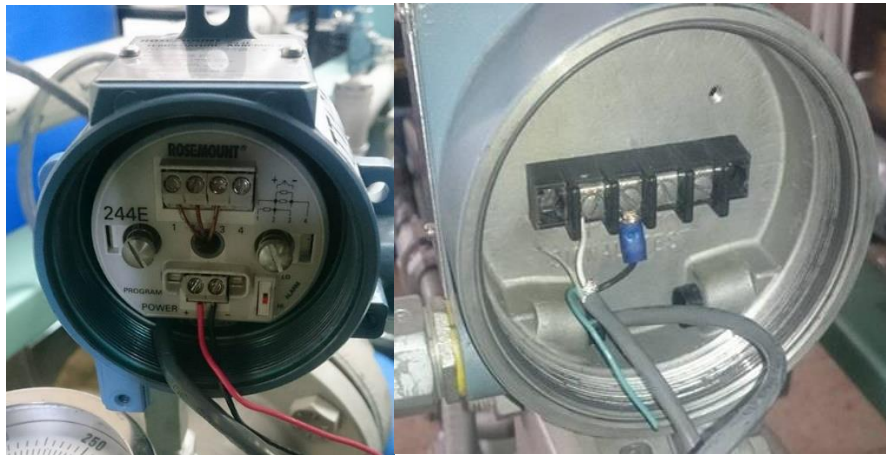


Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Este tipo de unión por medio de acople de rápida extracción elimina la necesidad de usar accesorios roscados o juntas bridadas, esto permite al usuario retirar o colocar rápidamente el elemento, pudiendo realizar cualquier tipo de actividad relacionada al mantenimiento. Su conexión eléctrica se debe hacer tomando en cuenta los colores de sus conductores, rojo alimentación 5V, negro GND y amarillo señal.

5.1.5 *Revisión de transmisores.* Al haberse realizado las pruebas pertinentes a los transmisores de presión y temperatura nos da como resultado que estos se encuentran en buenas condiciones. Lo que en este caso solo es necesario hacer una limpieza general de los elementos con sus respectivos ajustes, esto último muy importante para evitar posibles aflojamientos entre tornillos y conductores.

Figura 49. Limpieza y ajuste de transmisores



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.1.1 Montaje de transductor electroneumático. Realizadas las reparaciones pertinentes en el instrumento, se procedió al montaje de todos sus componentes. Primero se coloca mediante pernos el cuerpo del transductor a la estructura metálica del módulo, después se ubica el regulador de presión de aire y la sección de transformación en el cuerpo, conectando por último los terminales de alimentación de corriente.

Figura 50. Montaje de transductor electroneumático



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

El transductor cuenta con tornillos en su parte externa que sirven para realizar su calibración. Con la ayuda de un destornillador plano se hace girar principalmente el tornillo “cero” que mueve la boquilla en forma lineal, variando la presión que se suministra a la válvula neumática. Una vez encontrada la relación proporcional entre corriente y apertura de la válvula, se entenderá que esta calibrado.

5.1.2 Montaje de tarjeta de adquisición de datos. Antes de empezar a utilizar la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB-6009, lo primero que se debe hacer es instalar su entorno de desarrollo para la aplicación, así como sus controladores para poder manejar el dispositivo, de esta manera el sistema operativo puede realizar acciones con el hardware por medio de un interfaz.

5.1.2.1 Instalación de LabVIEW. Para instalar este software se deben tomar en cuenta los requisitos del sistema que necesita para su óptimo funcionamiento, ya que un pobre desempeño del equipo ralentiza tanto el desarrollo de programas como la ejecución de los mismos. A continuación se colocará una tabla con los requisitos mínimos que debe cumplir el sistema.

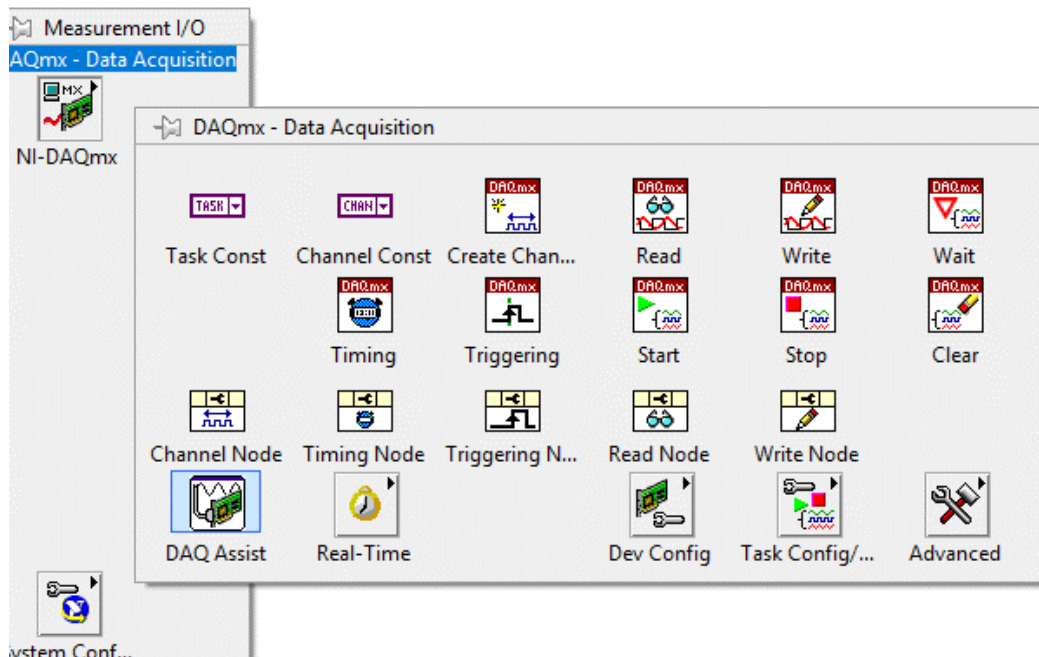
Tabla 16. Requisitos del sistema para instalar LabVIEW

Windows	Run-Time Engine	Development Environment
Processor	Pentium III/Celeron 866 MHz or equivalent	Pentium 4/M or equivalent
RAM	256 MB	1GB
Screen Resolution	1024 x 768 Pixels	1024 x 768 Pixels
Operating System	Windows 7/Vista (32-bit and 64-bit) Windows XP SP3 (32-bit) Windows Server 2003 R2 (32-bit) Windows Server 2008 R2 (64-bit)	Windows 7/Vista (32-bit and 64-bit) Windows XP SP3 (32-bit) Windows Server 2003 R2 (32-bit) Windows Server 2008 R2 (64-bit)
Disk Space	353 MB	3.67 GB (includes default drivers from the NI Device Drivers DVD)
Color Palette	N/A	LabVIEW and the <i>LabVIEW Help</i> contain 16-bit color graphics. LabVIEW requires a minimum color palette setting of 16-bit color.
Temporary Files Directory	N/A	LabVIEW uses a directory for storing temporary files. National Instruments recommends that you have several megabytes of disk space available for this temporary directory.
Adobe Reader	N/A	You must have Adobe Reader installed to search PDF versions of all LabVIEW manuals.
<p>Note: The following list describes restrictions for using LabVIEW on Windows.</p> <ul style="list-style-type: none"> • LabVIEW does not support Windows 2000/NT/Me/98/95 or Windows XP x64. • You cannot access LabVIEW using a Guest account on Windows. 		

Fuente: National Instruments

5.1.2.2 Instalación de NI-DAQmx. Al haber instalado LabVIEW, se procede a instalar NI-DAQmx, necesario para instalar cualquier dispositivo de hardware para que el sistema pueda detectarlo. Este software proporciona a los desarrolladores en sistemas DAQ controladores de alto rendimiento, además de varios servicios adicionales. Los requisitos necesarios para estos controladores son los mismos que utiliza el software LabVIEW (NATIONAL-INSTRUMENTS, 2014).

Figura 51. Herramientas NI-DAQmx



Fuente: LabVIEW 2015

NI-DAQmx ofrece al usuario instrumentos virtuales y adquisición de datos por medio de un computador. Los dispositivos simulados funcionan como si fueran uno real, se pueden crear tareas de NI-DAQmx a través del asistente DAQ o el API. Estos dispositivos simulados pueden realizar lo siguiente:

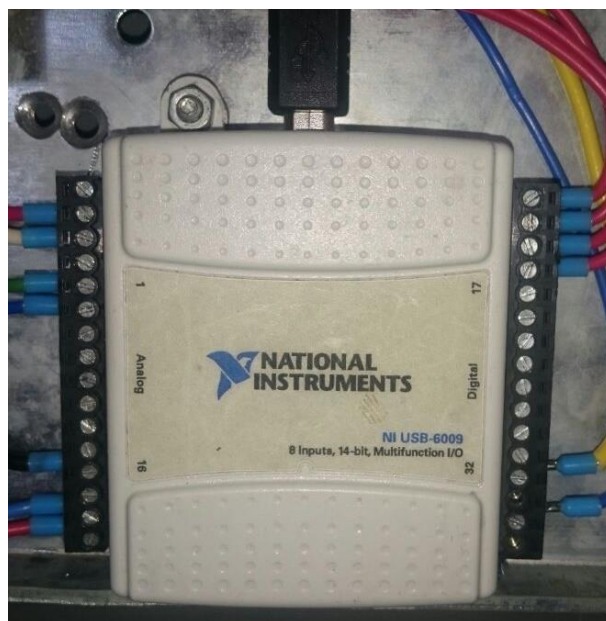
- Iniciar el desarrollo y lógica de aplicaciones sin necesidad de un hardware.
- Desarrollar la lógica de aplicación en otro equipo que no sea el sistema de destino.
- Evaluar la funcionalidad de adquisición del software de National Instruments sin poseer ningún tipo de hardware.

5.1.2.3 Montaje de la tarjeta. Después de haber instalado todos los controladores, procedemos a colocar la tarjeta en su ubicación respectiva junto al resto de dispositivos, la cual permanecerá fija. Esto para agilizar el uso del banco de pruebas, ya que el tiempo de clases es muy limitado. A continuación se describirá el proceso de instalación de la tarjeta DAQ USB-6009.

Montaje en el panel

- Atornillar la tarjeta al panel con tonillos M4, de tal forma que el acceso a los conectores sea muy accesible.
- Conectar el cable de datos USB en el puerto, de tal forma que el cable quede sin tensión sobre el dispositivo.
- Conectar el cable USB al PC. Si instaló todos los controladores necesarios el computador lo reconocerá inmediatamente. Además que a luz led se encenderá si se encuentra energizada la tarjeta.
- Compruebe el funcionamiento de la tarjeta con Measurements and Automation instalados previamente.

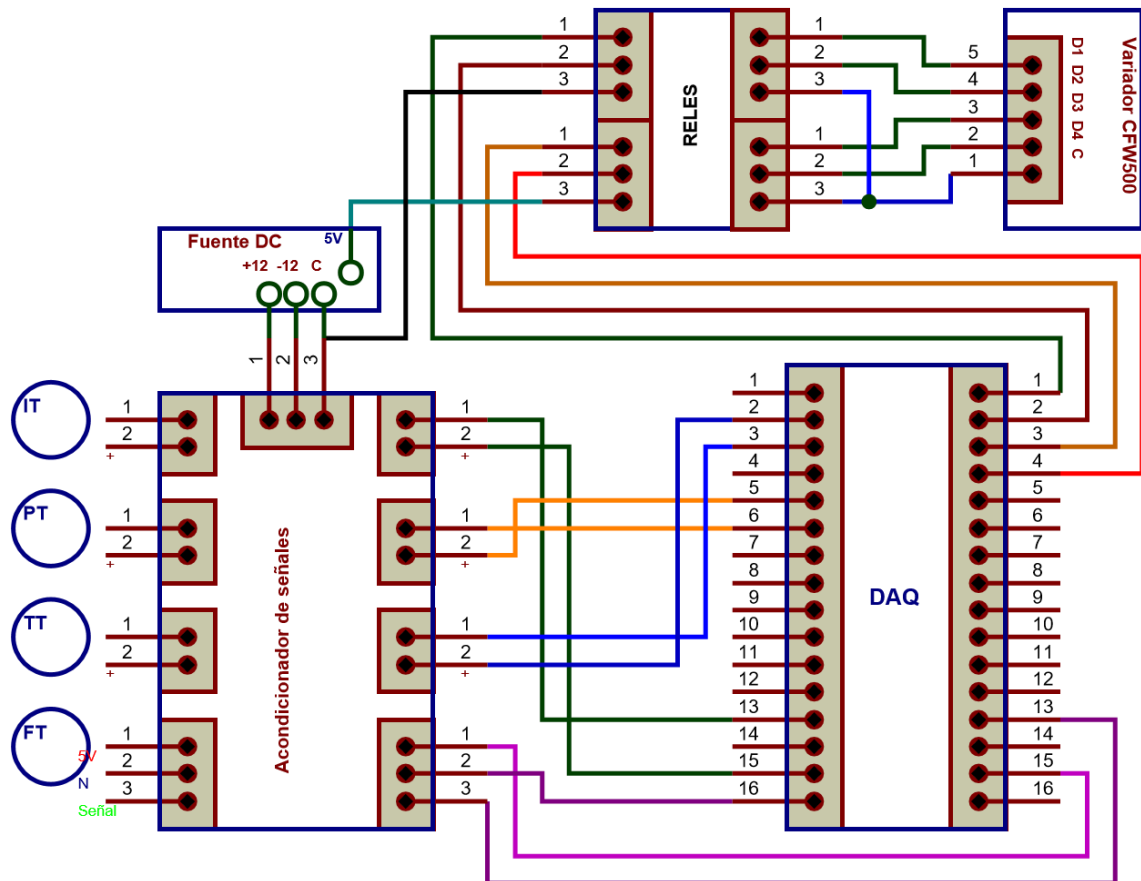
Figura 52. Montaje de DAQ 6009 en panel



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

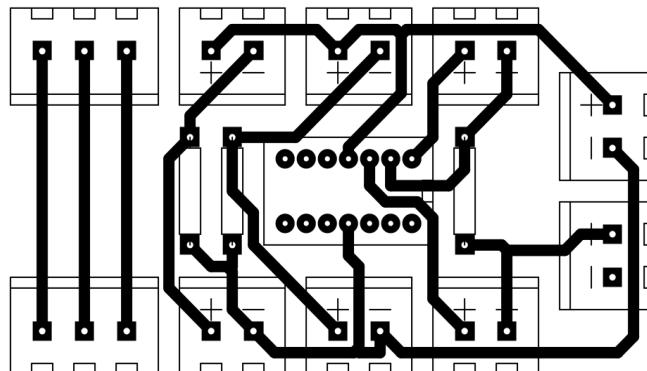
5.1.3 Conexión de instrumentos a la DAQ USB-6009. Mediante el siguiente esquema se procederá a explicar cómo se instalaron los elementos del banco de pruebas a la tarjeta. Una vez instalados todos los elementos en la tarjeta con sus respectivas conexiones se podrá a diseñar el programa en LabVIEW Mediante software y controladores instalados previamente.

Figura 53. Conexión de instrumentos a DAQ



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

Figura 54. Circuito de placa acondicionadora de señales



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.1.4 Montaje de tablero de control. Contiene los elementos necesarios para realizar las acciones de control. Cada uno de los elementos están distribuidos estratégicamente y de forma equitativa.

El tablero de control se conforma de la siguiente manera:

- Fuente de alimentación 5V-24V CD
- Breaker Bipolar 10A
- Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009
- Convertidor de frecuencia WEG CWF500
- Circuito acondicionador de señal
- Placa de relés

La fuente se alimenta de 220V CA respetando las indicaciones de placa, al igual que el convertidor de frecuencia. El circuito acondicionador de señal se alimenta con 24V CD y la placa de relés con 5V DC. La tarjeta NI DAQ 6009 se conecta al computador por medio de un cable con conector USB.

Figura 55. Tablero de control modificado



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.2 Programación gráfica en LabVIEW

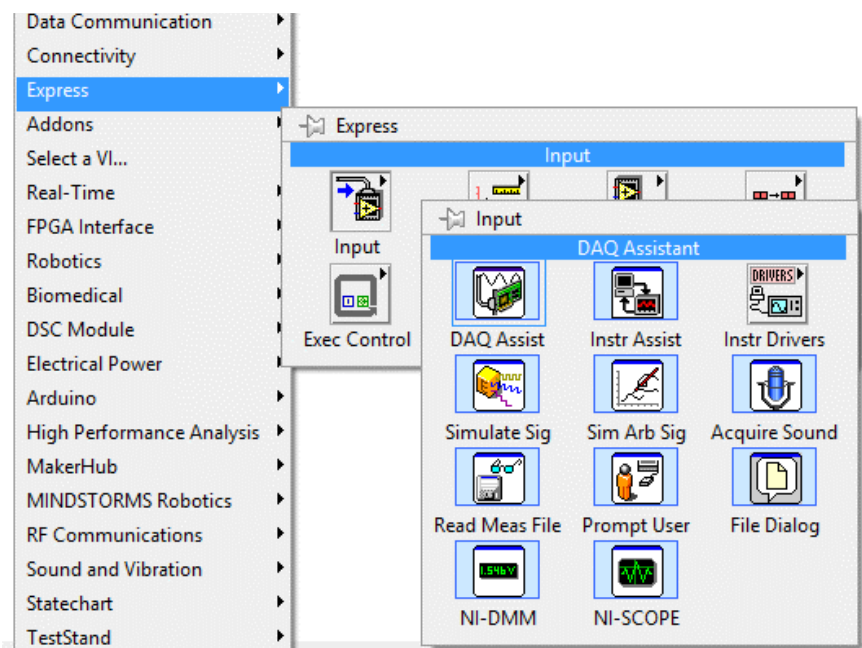
LabVIEW ofrece al usuario una gran variedad de herramientas para el desarrollo de programas, además que puede interactuar con distintos medios de comunicación para hardware. El hardware que necesite conectarse a LabVIEW necesita de controladores, estos se los puede encontrar en las librerías que brinda la National Instruments en su página oficial.

Antes de empezar a realizar cualquier tipo de programación para adquisición de datos es necesario conectar previamente la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ-6009 con su cable de datos al computador, luego comprobar si el programa tiene interacción con el hardware.

5.2.1 Adquisición de señales de presión y temperatura.

- Para adquirir las señales tanto de presión y temperatura se procede a utilizar el DAQ Assistant que ofrece LabVIEW, permitiendo la interacción con la tarjeta de adquisición de datos DAQ-6009. Esta herramienta se la puede usar en el diagrama de bloques y está ubicada en el menú de funciones.

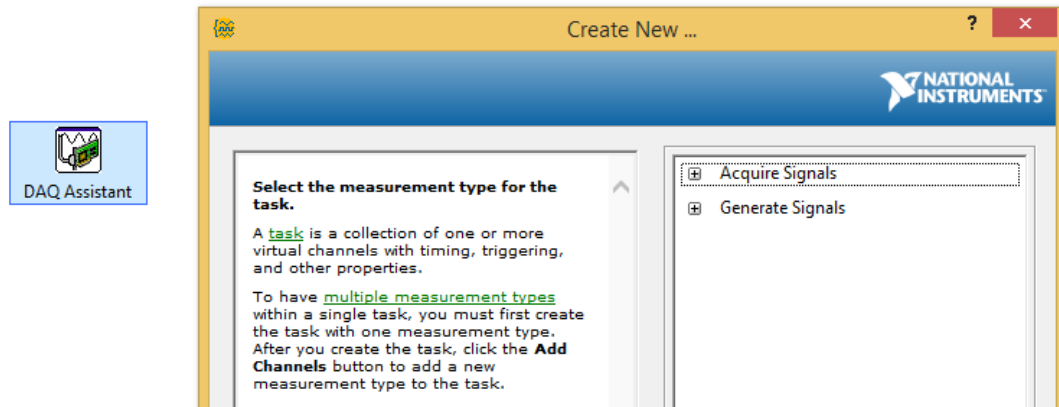
Figura 56. DAQ Assistant



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Dar clic en DAQ Assistant y aparecerá la siguiente ventana con dos opciones desplegables, en este caso se debe seleccionar la opción Adquirir Señales ya que se trata de sensores.

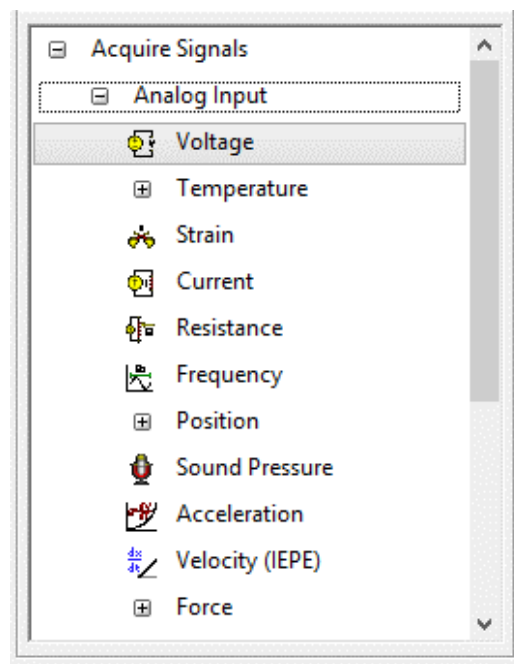
Figura 57. Adquisición de señales



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Del menú desplegable seleccionamos el tipo de señal analógica requerido, para este caso es “Voltaje”, ya que las señales de 4 a 20 mA que emiten los transmisores de presión y temperatura se transforman a un voltaje de entre 1 a 5V a través resistencias de 250 ohmios.

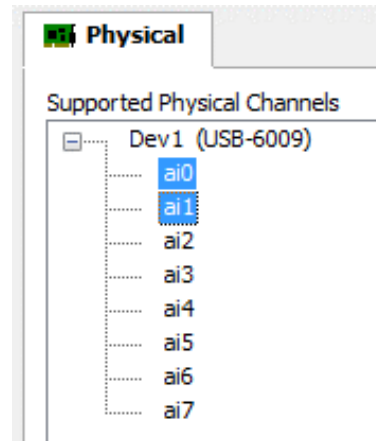
Figura 58. Adquisición de señales, entradas analógicas



Fuente. Tierra D. & Zamora M.

- Al haber seleccionado voltaje se debe escoger que entradas analógicas se van a utilizar, para este caso se va a utilizar la entrada analógica ai0 para presión y la entrada analógica ai1 para la temperatura.

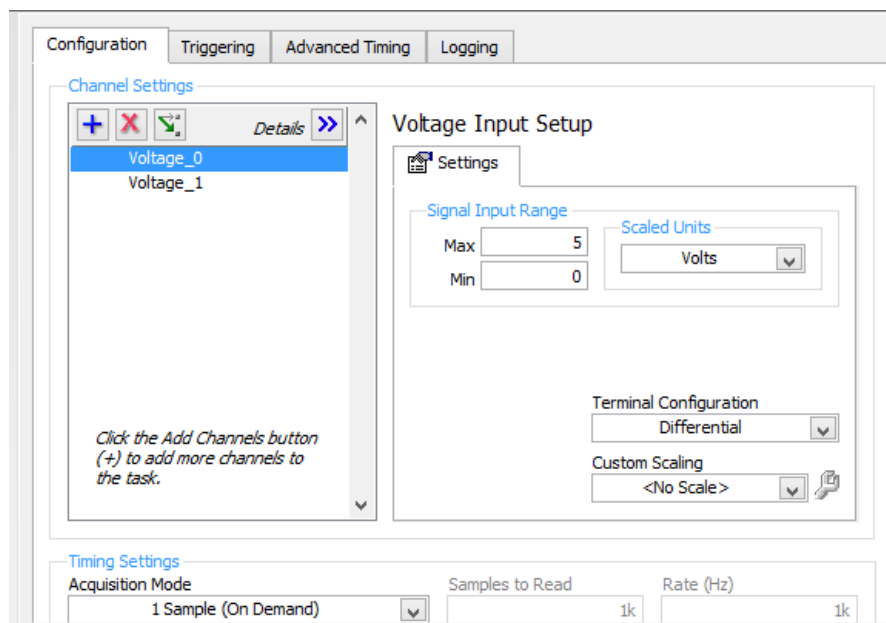
Figura 59. Selección de entradas analógicas



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Se configura los rangos de entrada para la lectura de la señal de voltaje en este caso será de 0 a 5V y el tipo de conexión diferencial. La conexión diferencial permite conectar la entrada de voltaje directamente a dos entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos.

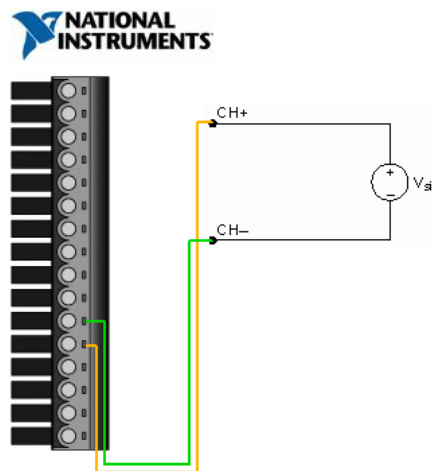
Figura 60. Configuración de rangos de entrada



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Conexión diferencial para presión y temperatura. Esta conexión se la debe realizar después de haber realizado previamente un acondicionamiento de señal de los transmisores. Obsérvese que la conexión utiliza dos entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos.

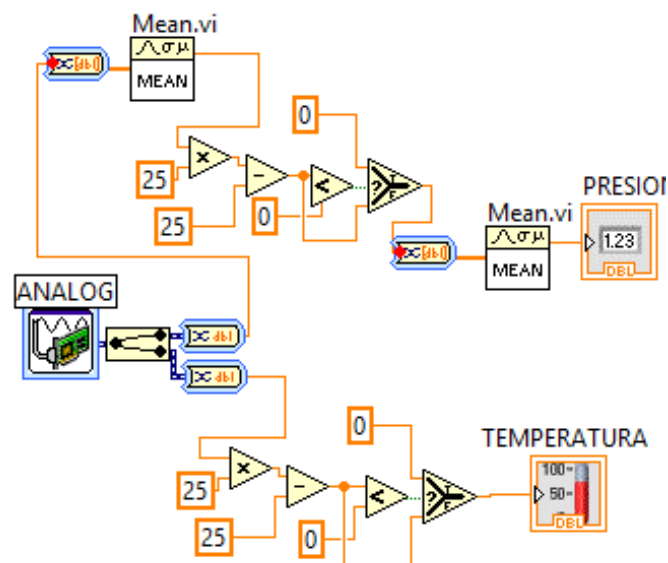
Figura 61. Conexión diferenciada para presión y temperatura



Fuente: LabVIEW

- Una vez configurados todos los parámetros necesarios, se realiza la programación gráfica correspondiente. Las señales que ingresan a la tarjeta se tratan mediante fórmulas para obtener valores de presión y temperatura los más exactos posible.

Figura 62. Programación de señales de presión y temperatura

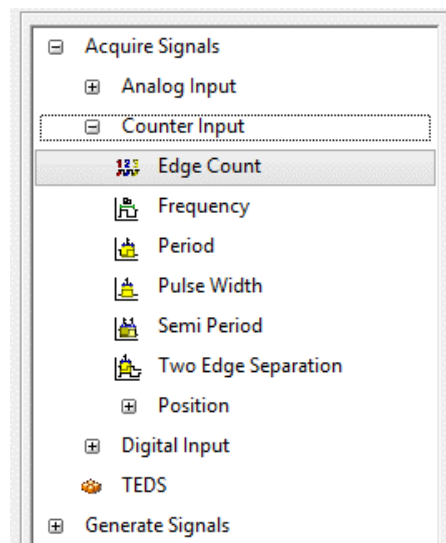


Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.2.2 Adquisición de datos de sensor de caudal

- Ya que el sensor de caudal instalado emite pulsos de acuerdo al flujo que circula a través de este, se ha optado por la utilización de la entrada de contador que viene incluida en la DAQ-6009. A continuación se muestra la configuración del contador mediante la utilización del DAQ Assistant de LabVIEW.

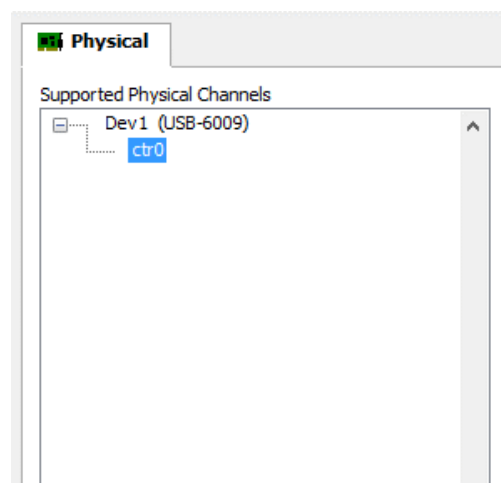
Figura 63. Contador de pulsos



Fuente : Tierra D. & Zamora M.

- Al dar clic en Edge Count se elige el contador ctr0 que es el pin 29 de la DAQ como se muestra en la figura.

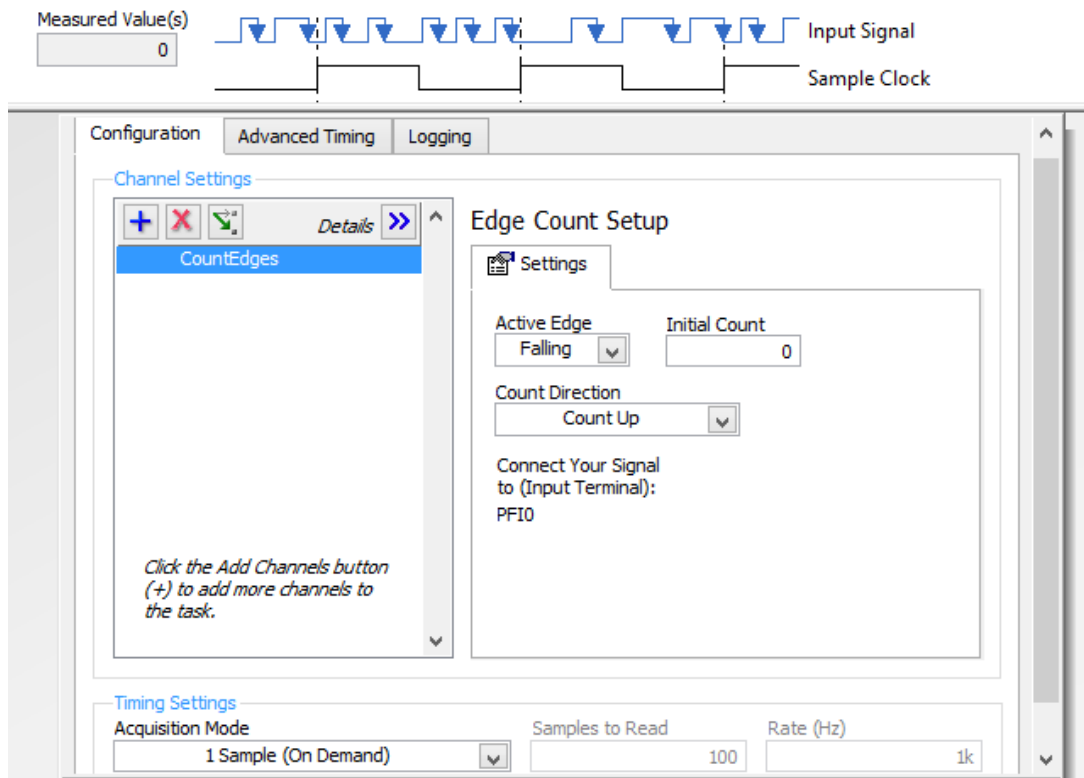
Figura 64. Entrada de contador de NI DAQ 6009



Fuente : Tierra D. & Zamora M.

- Finalmente se configura el valor inicial del contador que en este caso será 0 y el tipo de detección de los pulsos para este caso se elige el flanco de bajada como se muestra en la figura.

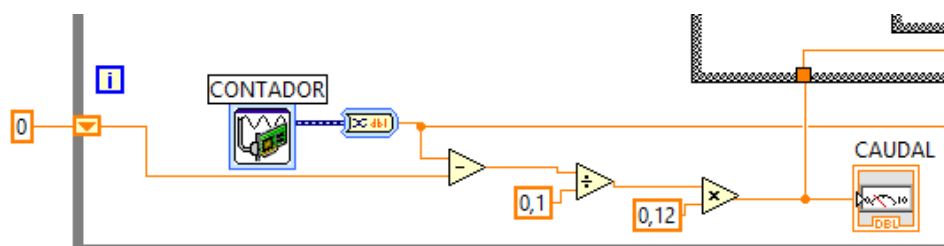
Figura 65. Configuración de contador



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Una vez configurados todos los parámetros necesarios, se realiza la programación gráfica. Las señales que ingresan en forma de pulsos a la tarjeta se tratan mediante fórmulas para obtener el valor de caudal. El valor obtenido deberá ser los más parecido posible al totalizador mecánico.

Figura 66. Programas de contador para medir caudal



Fuente. Tierra D. & Zamora M.

5.2.3 Configuración de salidas digitales para control del variador de frecuencia

- Para el control remoto multi-velocidades del variador de frecuencia se utiliza las salidas digitales de la 1 a la 4 la primera salida digital sirva para el comando MARCHA/PARO del variador, en cambio las otras tres salidas digitales de la DAQ sirven para realizar el cambio de velocidades, ya que se cuenta con 3 datos binarios de las salidas se puede llegar a tener un total de 8 combinaciones para las velocidades del variador.

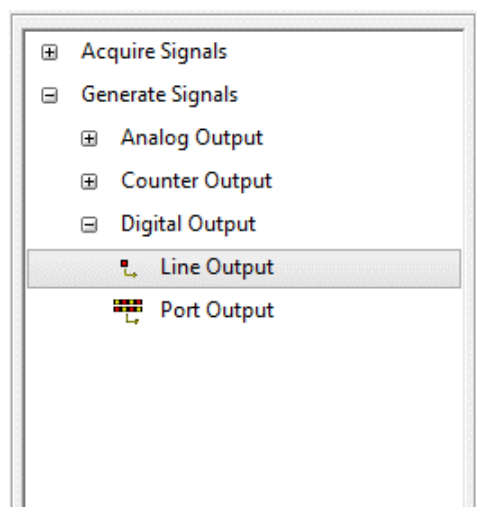
Tabla 17. Combinaciones de salidas digitales para velocidades

Combinación salidas digitales 2,3,4 DAQ			Referencia de frecuencia para variador
DO2	DO3	DO4	FREQ. [Hz]
0	0	0	0
0	0	1	11
0	1	0	17
0	1	1	24
1	0	0	31
1	0	1	38
1	1	0	45
1	1	1	52

Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Para generar una salida digital se utiliza de igual manera el DAQ Assistant pero en este caso se elige “Generar Señales” de tipo digital.

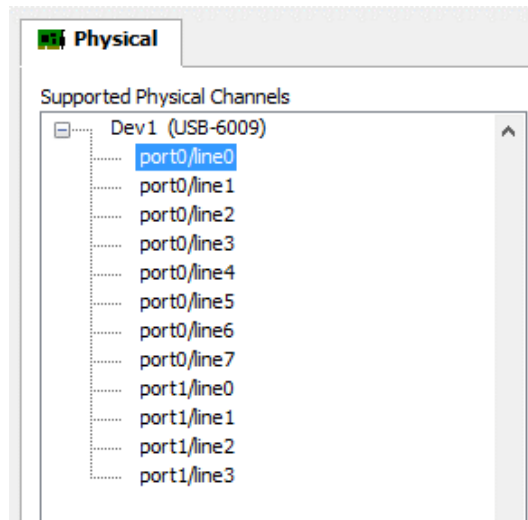
Figura 67. Creación de salida digitales



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Se selecciona el número de salida digital que se desea. Este proceso se lo debe hacer para cada una de las cuatro salidas que se necesitan.

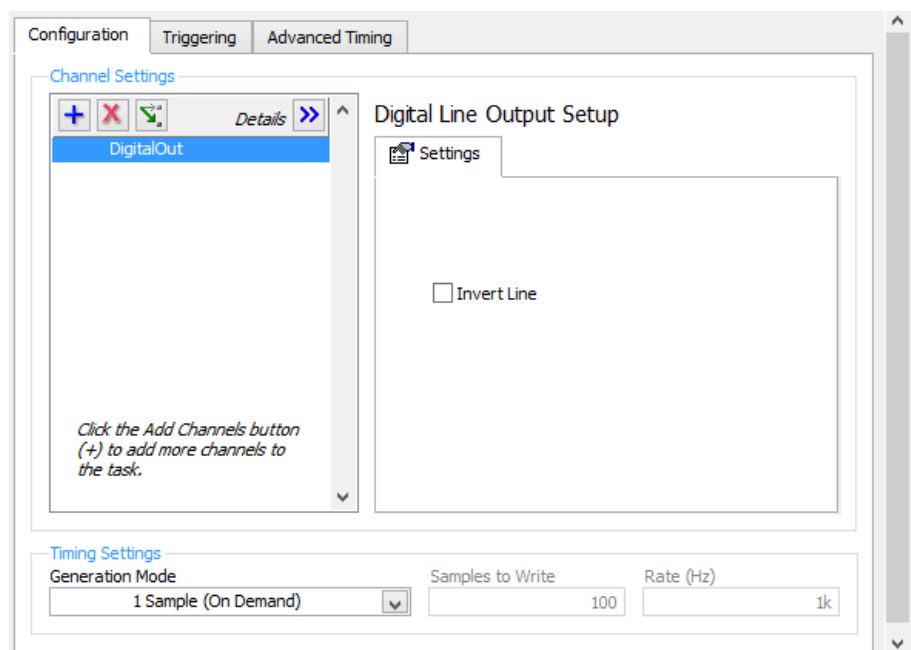
Figura 68. Salidas digitales



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Finalmente se confirma la creación de la salida digital. Solo se debe verificar que el modo de generación este en “1 Sample”. Esto se debe hacer para cada una de las cuatro salidas digitales.

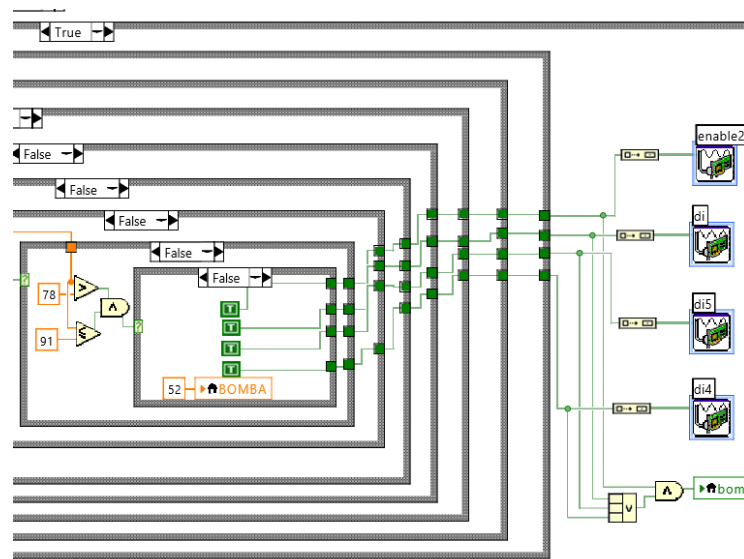
Figura 69. Creación de las salidas digitales



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Después de haber configurados todos los parámetros requeridos, se realiza la programación gráfica. Las salidas digitales envían señales de voltaje hacia la placa de relés, la cual se encarga de hacer las combinaciones de señales digitales del variador de frecuencia. Esta combinación se hace de forma automática en base a condiciones ingresadas en el programa.

Figura 70. Control automático de variador CFW500



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

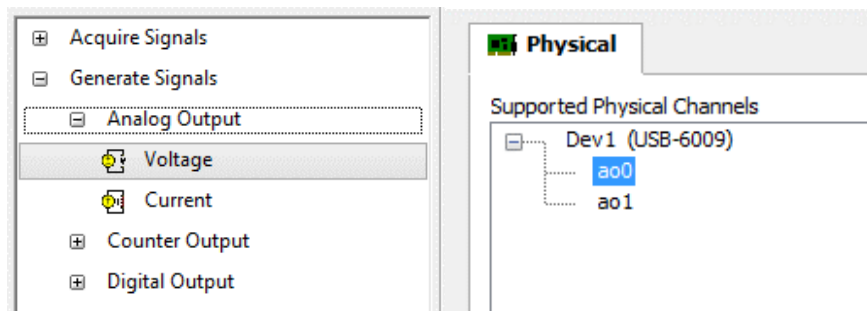
5.2.4 Configuración de salida analógica para transductor electroneumático

- Para el posicionamiento de la válvula Fisher se dispone de un transductor de corriente a presión, es decir el transductor recibe una señal de 4 a 20 mA y lo transforma en una salida de presión de 3 a 15psi.

Debido a que las salidas analógicas de la DAQ-6009 son solo de voltaje se construyó en primera instancia un conversor de voltaje a corriente con un amplificador operacional (recibe 1 - 5V y transforma a 4 -20mA para el transductor I/P)

- Para generar las salidas analógicas de voltaje a través de la tarjeta de adquisición de datos se abre el DAQ Assistant y se elige Generar Señales, Salida Analógica de Voltaje.

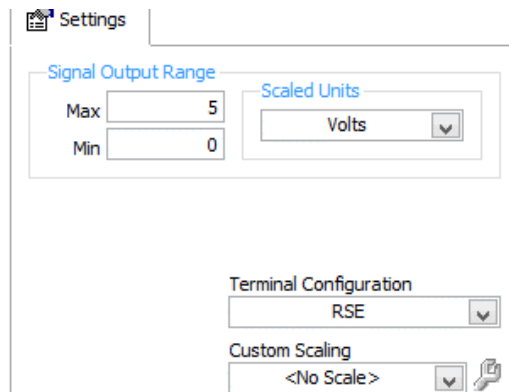
Figura 71. Creación de salida analógica de voltaje



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Finalmente se configura los rangos de salida en este caso de 0 a 5V, este rango es de tipo variable, colocar la configuración del terminal en RSE.

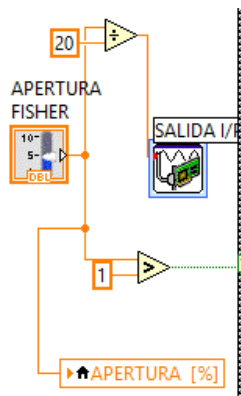
Figura 72. Configuración salida analógica



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- Después de tener configurados todos los parámetros requeridos, se procede a realizar la programación respectiva.

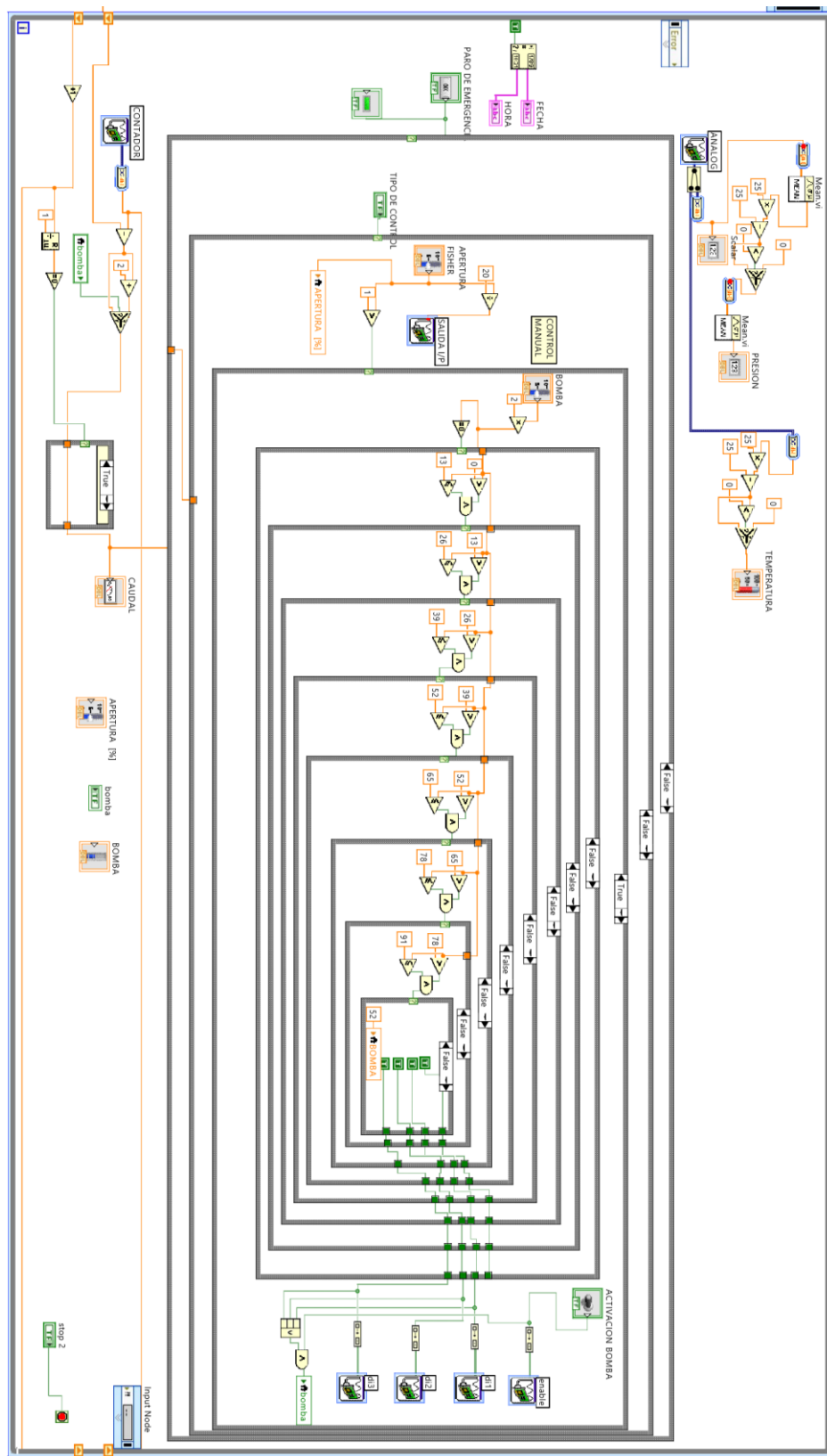
Figura 73. Programa para controlar válvula electroneumática



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.2.5 Programa completo en LabVIEW para medición y control de flujo

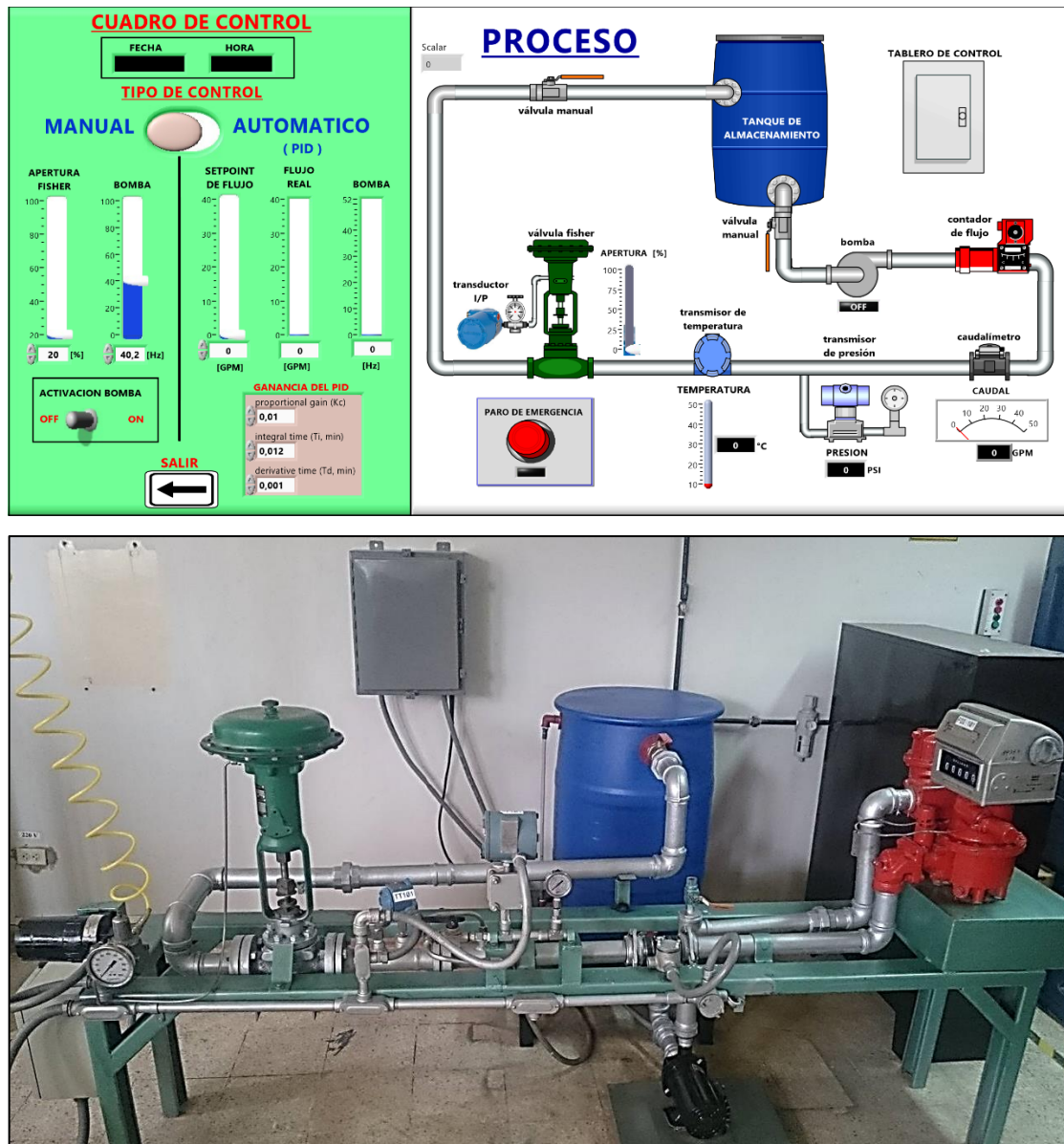
Figura 74. Programa para medición y control de flujo



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

5.2.6 Panel de control en LabVIEW. En la imagen se muestra el panel de control, el mismo que se está dividido en dos partes: del lado izquierdo se muestra el cuadro de control donde se encuentran botones, consignas, etc. Y del lado derecho se encuentra la representación del proceso físico realizado, donde se puede apreciar los sensores y actuadores del sistema entre otras partes importantes del sistema.

Figura 75. Panel de control en LabVIEW



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

- **Pantalla de inicio:** Al pulsar el botón panel de control se procede a abrir la pantalla del proceso, caso contrario se mantendrá en esta pantalla. Si se desea finalizar todo se debe pulsar el botón salir.

- **Cuadro de control:** En primera instancia se puede observar la fecha y hora. El sistema consta de 2 tipos de controles, Manual y Automático.

El control manual permite actuar sobre la bomba y la válvula Fisher a conveniencia del operador, este tipo de control es necesario ya que en muchas ocasiones se necesita realizar solamente calibraciones, pruebas y mantenimiento de los equipos.

El control automático trabaja con un controlador proporcional, integral y derivativo (PID), su funcionamiento basta con seleccionar el setpoint de flujo y el sistema automáticamente actuará sobre la bomba y la válvula para modificar la variable de flujo medida hasta igualar el valor del setpoint deseado.

- **Proceso:** En esta parte de la venta del panel de control se encuentra una representación con los sensores instalados y sus señales adquiridas, como es el caso del transmisor de presión, temperatura y el sensor de caudal, así mismo se muestra el posicionamiento de la válvula y el estado de la bomba.

Adicional a esto se tiene un botón de paro de emergencia el cual tiene prioridad sobre cualquier estado del proceso, deteniéndolo en caso de alguna anomalía.

5.2.7 Pruebas de funcionamiento generales. Con el banco de pruebas y el programa de control terminados se procede hacer pruebas de funcionamiento generales en todo el sistema.

Es necesario seguir las indicaciones que se describen a continuación antes de ejecutar el programa, el incumplimiento de las mismas puede alterar el funcionamiento y generarse fallas indeseables de los elementos y equipos del sistema.

Revise el nivel de líquido mínimo necesario en el tanque de almacenamiento mediante el visor de nivel, luego ponga en cero el registrador de caudal manualmente con la perilla que tiene al costado derecho cada vez que se va a tomar una nueva lectura de caudal.

Asegúrese que la válvula V1 se encuentre abierta, ya que controla el paso de líquido a la bomba, también antes de realizar cualquier prueba, luego purgue el aire del sistema utilizando la válvula V2, tenga en cuenta que la misma debe estar cerrada para la

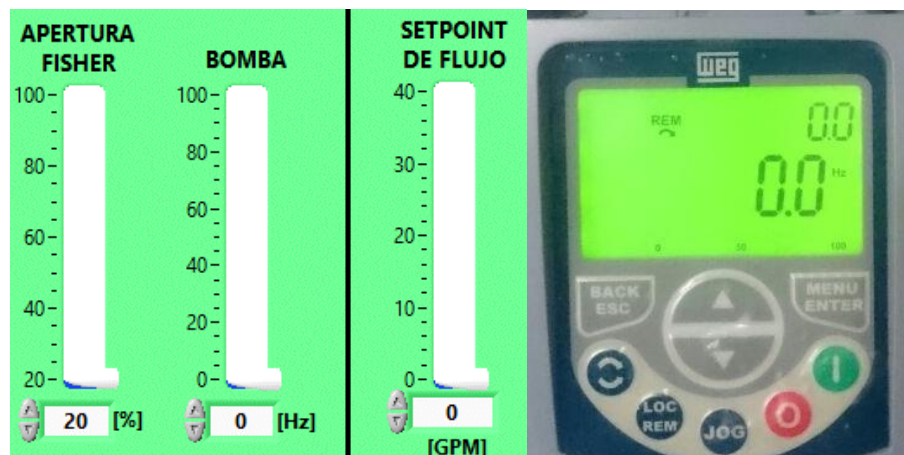
operación del banco de pruebas, de no hacerlo así, al arrancar el sistema el fluido saldrá por esta válvula provocando derrame de líquido.

Asegúrese que la presión de aire se encuentre entre 20 y 120 psi para el transductor electroneumático, de no ser así regule la presión y alimente el mismo con la toma más cercana, además, revise que el compresor general del laboratorio esté encendido.

Revisar que el cable de alimentación del módulo se conecte a 220 V AC y el cable de datos USB de la tarjeta esté conectado al computador. Se procede a abrir el programa en LabVIEW y activar el disyuntor para alimentar de energía eléctrica al tablero de control.

Finalmente se debe ejecutar el programa en LabVIEW revisando que todos los valores de control estén encendidos y solo de esta forma proceder a ubicar el variador en forma remota “REM” con la tecla “LOC/REM” para poder arrancar el sistema.

Figura 76. Condiciones de arranque sugeridas



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

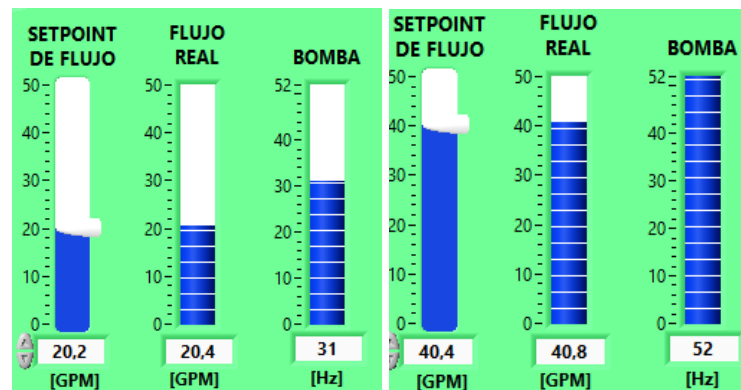
Las pruebas se realizan en el programa diseñado en LabVIEW utilizando el modo manual y automático que tiene el interface de usuario.

Para acceder al modo manual o automático se debe utilizar el selector de “TIPO DE CONTROL” que se encuentra ubicado en la parte superior izquierda. El modo manual permite utilizar de forma independiente la apertura de la válvula proporcional y establecer velocidades fijas a la bomba centrífuga. Se debe tomar en cuenta que el switch de activación de la bomba esté encendido “ON”.

Principalmente esta modalidad permite realizar calibraciones y mantenimiento de los instrumentos. Las variaciones se realizan de manera individual a través de la fijación de los cursores de apertura de Fisher y bomba correspondientemente.

La forma automática tiene la única opción de fijar el SETPOINT, bajo el rango permitido de 0 a 40 GPM, valores de caudal que puede entregar el sistema. Al establecer un valor determinado en el SETPOINT, el control PID actúa de manera inmediata llevando el valor de flujo real hasta el punto fijado lo mas aproximadamente posible. Las ganancias utilizadas son referenciales a otro tipo de sistemas similares.

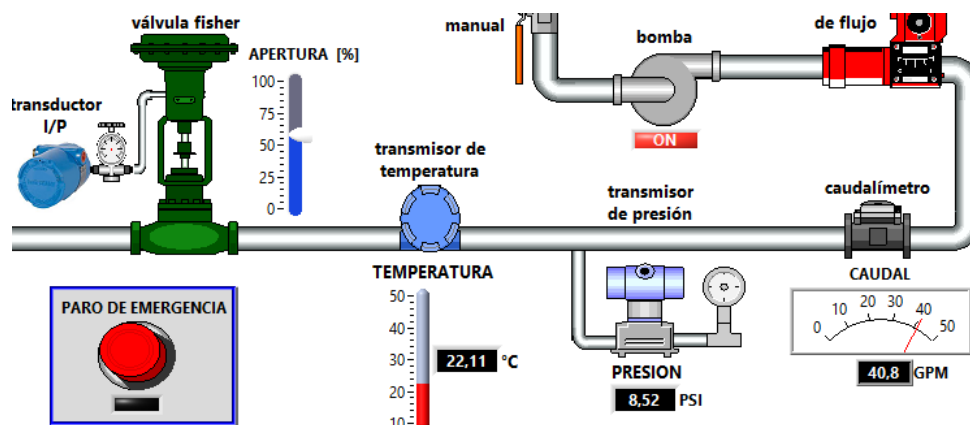
Figura 77. Pruebas con control PID



Fuente: Tierra D. & Zamora M.

El panel de control muestra como reaccionan los diferentes componentes del sistema a medida que se hacen variaciones en la tasa de flujo. Con estas variables se puede entender como evoluciona el proceso en tiempo real.

Figura 78. Cambio de variables en el proceso



Fuente. Tierra D. & Zamora M.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se logró seleccionar los dispositivos adecuados para el banco de pruebas de control y flujo, según las características de adquisición de datos de la tarjeta NI DAQ 6009 que opera el sistema para acondicionar a la capacidad de su potencia, también se consiguió y construyó elementos y accesorios necesarios para completar el sistema, de la misma manera, se efectuó la instalación correspondiente en función de la mejora propuesta optimizando espacio físico tanto en el tablero de control como alrededor de los instrumentos instalados.

Se realizó un programa de control adecuado en base al sistema SCADA, en el cual se aplica un control PID, tomando como dato principal los pulsos del caudalímetro para establecer un Set-Point de caudal, para el cual, LabVIEW ofrece una variedad de herramientas y recursos para la adquisición, control de datos en tiempo real, además de varias funciones para estabilizar sistemas de manera fácil y sencilla por ejecutarse de manera gráfica.

Las pruebas de funcionamiento demostraron un control automático integral de los elementos que generan señales, para lo cual, se observó que la calibración y cuidados en el montaje, son necesarios para disminuir interferencias para una correcta lectura de datos y pronta respuesta por el programa de control, también que es esencial relacionar los datos generados por los instrumentos con los indicadores del programa. Además se logró utilizar fuentes de energía como aire presurizado para el transductor y energía eléctrica al tablero de control.

Se realizó el plan de mantenimiento para prevenir paros imprevistos y cumplir con el tiempo de vida de los elementos del banco de pruebas de control y flujo, dicho plan ayudará a la comprensión de los principios funcionamiento con los cuales se forma el sistema. A si también se evaluó las guías del estudiante en función del aprendizaje adquirido.

6.2 Recomendaciones

Seguir las indicaciones de los manuales de usuario y mantenimiento ya que en estos se encuentran descripciones detalladas de los principios de funcionamiento, además de la forma de como calibrar los instrumentos en caso de sufrir desperfectos

Asegurarse de instalar los controladores de adquisición de datos para manipular el software LabVIEW, además, conocer las funciones básicas para poder entender la forma de adquirir los datos de forma particular.

BIBLIOGRAFÍA

ACEBEDO SÁNCHEZ, José. *Instrumentación y control avanzado de procesos.* 1^{ra} ed. España : Díaz de Santos, 2006, pp. 3-20.

ÁLVARES PULIDO, Manuel. *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR.* 1^{ra} ed. Barcelona España : Marcombo, 2000, pp 1-9.

ASTROM, Karl & HAGGLUND, Tore. *Control PID avanzado.* 1^{ra} ed. Madrid España : Pearson Education, 2009, pp. 67-76.

BALCELLS, Josep & ROMERAL, José Luis. *Autómatas programables.* 1^{ra} ed. Barcelona : Marcombo, 1997, pp. 41-50.

CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación Industrial.* 8^{va} ed. Barcelona : MARCOMBO,S.A., 2010, pp. 51-69.

CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos Industriales su Ajuste y Calibración.* 3^{ra} ed. Barcelona España : Marcombo, 2009, pp. 34-42

FMC-TECHNOLOGIES. *Medidor de Desplazamiento Positivo de Alabes Giratorios.* Houston : s.n., 2006, pp. 2-4.

LAJARA VIZCAÏNO, José Rafael & PELIGRÍ SEBASTIÁ, José. *LabVIEW Entorno gráfico de programación.* 2^{da} ed. Barcelona España : MARCOMBO, S.A., 2011, pp. 91-205

MCMILLAN, Gregory & CONSIDANE, Douglas. *Process industrial instruments and control handbook.* 5^{ta} ed. New York : McGRAW-HILL, 1999, pp. 110-121.

MENDOZA MENDOZA, Miguel Angel. *Instrumentacion, Simbología, Normas y Sistemas de Unidades.* [en linea] *Introduccion a la instrumenración.* 2014, pp. 10-16. [Consulta: 10 de noviembre 2016]. Disponible en: <https://topicoselectronica.files.wordpress.com/2014/02/instrumentacion-normas-y-simbologia.pdf>

MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. 6^{ta} ed.. México : Pearson Education, 2006, pp. 474-499.

PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores y acondicionadores de señal*. 4^{ta} ed. Barcelona : Marcombo, 2003, pp. 1-20.

RODRÍGUEZ PENIN, Aquilino. *Sistemas SCADA*. 2^{da} ed. Barcelona (España) : Marcombo, ediciones técnicas 2007, pp. 33-43.